
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ERKEN TASARIM AŞAMASINDA BİNA BİLGİ MODELLEMESİ TABANLI BİNA ENERJİ MODELLEMESİ

Nahide NANVAI FARKHAD

DOKTORA TEZİ
MİMARLIK ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Nahide NANVAI FARKHAD

21/07/2025

ERKEN TASARIM AŞAMASINDA BİNA BİLGİ MODELLEMESİ TABANLI BİNA ENERJİ MODELLEMESİ

(Doktora Tezi)

Nahide NANVAI FARKHAD

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Günümüzde yüksek enerji performansına sahip yapıların tasarımı, özellikle erken tasarım aşamasında verilen kararların yapının bütünsel enerji performansı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Bu durum, tasarım sürecine yönelik karar destek sistemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmakta ve Bina Bilgi Modellemesi (BIM) tabanlı Bina Enerji Modellemesi (BEM) yaklaşımlarının entegrasyonunu teşvik etmektedir. Bu tez çalışmasında, yüksek enerji performanslı bina tasarımı sürecine katkı sağlamak amacıyla, BIM tabanlı BEM ile entegre çalışan üretken tasarım (generative design) yaklaşımına dayalı bir yöntem önerilmiştir. Soğuk ve kuru iklim koşullarına özgü olarak geliştirilen bu yöntem, erken tasarım aşamasında mimarların farklı bina kütlelerini üretmesine, bu alternatifleri enerji performansı açısından analiz etmesine ve optimize edilmiş çözümleri belirlemesine olanak tanımaktadır. Revit-Dynamo platformu üzerinde geliştirilen parametrik algoritmalar aracılığıyla, öncelikle biçim faktörü ve kat alanı gibi kriterlere dayalı olarak çeşitli bina formları oluşturulmuştur. Sonrasında, cephe tasarımı özelinde pencere yerleşimleri ile WWR (Window-to-Wall Ratio) oranları parametrik olarak tanımlanmış ve alternatif tasarım senaryoları elde edilmiştir. Geliştirilen her bir alternatif, Autodesk Green Building Studio yazılımı kullanılarak enerji simülasyonlarına tabi tutulmuş ve EUI (Energy Use Intensity) değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, düşük biçim faktörüne sahip kompakt bina formları ile cephe düzeyinde optimize edilmiş pencere tasarımlarının enerji verimliliği üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. Geliştirilen algoritma aracılığıyla üretilen tasarım varyasyonları arasından seçilen on model, Autodesk Revit ortamında yeniden modellenmiş ve Autodesk Insight platformu kullanılarak enerji kullanım yoğunluğu (EUI) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, algoritma tarafından gerçekleştirilen simülasyon çıktıları ile karşılaştırılmış; doğruluk değerlendirmesi sonucunda ortalama %94,04 oranında bir Gerçeklik Yüzdesi elde edilmiştir. Bu bulgu, geliştirilen sistemin güvenilirliğini ve enerji performansı açısından karar verme süreçlerinde etkin biçimde kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Bilim Kodu	:	80130
Anahtar Kelimeler	:	BIM, BEM, yüksek enerji performansı, erken tasarım aşaması, enerji verimliliği, üretken tasarım
Sayfa Adedi	:	149
Danışman	:	Prof. Dr. Figen BEYHAN

BUILDING INFORMATION MODELING BASED BUILDING ENERGY MODELING IN EARLY DESIGN STAGE

(Ph. D. Thesis)

Nahide NANVAI FARKHAD

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

In contemporary architectural practice, the design of buildings with high energy performance increasingly highlights the decisive role of early-stage design decisions on the overall energy efficiency of a structure. This situation necessitates the development of decision support systems for the design process and promotes the integration of Building Information Modeling (BIM)-based Building Energy Modeling (BEM) approaches. In this thesis, a method based on a generative design approach integrated with BIM-based BEM is proposed to contribute to the design of high-energy-performance buildings. Specifically developed for cold and dry climatic conditions, the proposed method enables architects to generate various building masses during the early design phase, analyze these alternatives in terms of energy performance, and identify optimized solutions. Using parametric algorithms developed on the Revit-Dynamo platform, various building forms were initially generated based on criteria such as form factor and floor area. Subsequently, in relation to façade design, window placements and Window-to-Wall Ratio (WWR) values were parametrically defined, and alternative design scenarios were obtained. Each developed alternative was subjected to energy simulations using Autodesk Green Building Studio, and evaluated based on their Energy Use Intensity (EUI) values. The study demonstrated that compact building forms with low form factors and façade-level optimized window designs have a significant impact on energy efficiency. Among the design variations generated by the developed algorithm, ten models were selected, re-modeled within the Autodesk Revit environment, and their EUI values were recalculated using the Autodesk Insight platform. The results obtained were compared with the simulation outputs generated by the algorithm, yielding an average Reality Percentage of 94.04% in the accuracy assessment. This finding confirms the reliability of the developed system and its effective applicability in decision-making processes regarding energy performance.

Science Code	:	80130
Key Words	:	BIM, BEM, high energy performance, early design stage, energy efficiency, generative design
Page Number	:	149
Supervisor	:	Prof. Dr. Figen BEYHAN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında emeği geçen, destek olan ve bana ilham veren herkese en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Öncelikle, akademik sürecim boyunca bilgi, deneyim ve desteğiyle bana yol gösteren, tezimin her aşamasında sabırla katkı sağlayan değerli danışmanım Prof. Dr. Figen BEYHAN'a teşekkür ederim. Varlığınız ve yönlendirmeleriniz benim için büyük bir şanstı.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, koşulsuz sevgileri ve destekleriyle bana güç veren sevgili anneme ve babama sonsuz teşekkür ederim. Varlığınız en büyük dayanağım oldu.

Bu sürecin en zorlu anlarında bile yanımda olan, anlayışı, sabrı ve sevgisiyle beni motive eden hayat yoldaşım Vahid'e gönülden teşekkür ederim. Varlığın, bana her zaman en büyük güç kaynağı oldu.

Ve hayata bakışımı tamamen değiştiren, bana bambaşka bir anlam kazandıran, güzel kızım Damla sen bu tez yazılırken dünyama geldin ve varlığınla bana sabretmeyi, umut etmeyi ve daha güçlü olmayı öğrettin. Bu tez, senin küçük gülüşlerinin arasında yazıldı. Seninle her şey daha güzel.

Teşekkür ederim… hepinize.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÖZETİ 7

2.1. Bina Tasarım Süreci 7

2.1.1. Ulusal standartlara (AIA, RIBA, HOAI) göre bina tasarım aşamaları 9

2.1.2. Bina tasarım sürecindeki aşamalar 13

2.2. Erken Tasarım Aşamasının Getirdiği Avantajlar 14

2.3. Bina Tasarım Süreci Yöntemleri 16

2.4. Üretken Tasarım 18

2.4.1. Üretken tasarım çalışma prensibi 20

2.4.2. Üretken tasarım sistemleri 22

2.4.3. Üretken tasarım ve BIM entegrasyonu 23

2.5. Üretken Tasarım Yöntemleri 24

2.6. Biçim Gramerleri 32

2.7. Dijital ve Hesaplamalı Tasarımın Geleceği 37

3. BİNA ENERJİ MODELLEMESİ TABANLI BİNA BİLGİ MODELLEMESİ 41

3.1. BIM-BEM Teknolojik Yaklaşımları 42

3.1.1. Birleşik model yöntemi 42

Sayfa

3.1.2. Merkezi model yöntemi 44
3.1.3. Uygulama zinciri 45
3.1.4. Ara yazılım aracı 48
3.1.5. Değişim gereksinimi 50
3.2. BIM Kavramı 54
3.2.1. BIM uygulamaları 56
3.3. BIM Dosyası 59
3.3.1. IFC (Industry foundation classes) 59
3.3.2. gbXML (Green building XML) 60
3.3.3. gbXML ve IFC arasındaki karşılaştırma 61
3.4. BEM Kavramı 62
3.4.1. Simülasyon motorları 64
3.4.2. Grafiksel kullanıcı arayüzleri 64
3.4.3. Simülasyon ortamları 65
3.5. BIM-BEM Süreci için Bilgi Gereksinimi 68
3.6. Tasarım Sürecinde BIM-BEM Uygulaması İçin Mevcut sınırlamalar 69
3.7. Erken Tasarım Aşamasında BIM Tabanlı BEM Sürecin Problemleri 70
3.8. Bina Bilgi Modellemesi Tabanlı Bina Enerji Modellemesi Sürecinin Çözüm Önerileri 76
3.8.1. IFC tabanlı çözümler 77
3.8.2. gbXML tabanlı çözümler 83
3.8.3. BIM tabanlı Modelica BEM 88
3.9. BIM-BEM Entegrasyonunun Geleceği 90
3.10. BIM-BEM İçin Sürdürülebilirlik Yaklaşımları 91
4. YÖNTEM 93
4.1. Parametrik Tasarım ve Biçim Grameri ile Form Üretimi 95

Sayfa

4.2. Üretken Tasarım için Biçim Grameri Tabanlı Algoritma Geliştirme..... 97

4.3. Cephe Tasarımı İçin Geliştirilen Dynamo Algoritması..... 99

5. BULGULAR VE TARTIŞMA..... 107

5.1. Üretken Tasarım Algoritmasının İşleyişi ve Uygulama Süreci..... 107

5.2. Önerilen Algoritmanın Doğruluk Testi 118

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 129

KAYNAKLAR 133

ÖZGEÇMİŞ 149

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 2.1.	IDP ve geleneksel tasarım süreci arasındaki farkı	9
Çizelge 2.2.	AIA, RIBA ve HOAI'yi takip eden tasarım aşamalarının karşılaştırılmas	11
Çizelge 2.3.	Şemalar, derecelendirmeler ve sürece dayalı farklı GBC'nin karşılaştırılmas	12
Çizelge 3.1.	BIM tabanlı enerji modelleme süreçlerinde karşılaşılan problemler, önerilen çözümler, kullanılan yöntemler ve teknolojik yaklaşımlar	52
Çizelge 3.2.	BIM tabanlı BEM için teknolojik yaklaşımlar yöntemleri karşılaştırmak	54
Çizelge 3.3.	Tasarım sürecinde LOD için belirtilen her seviyenin tanımı	58
Çizelge 3.4.	Literatür taramasına dayalı gbXML ve IFC arasındaki karşılaştırma	61
Çizelge 3.5.	Literatürde araştırmacılar tarafından kullanılan uygulamalar	66
Çizelge 3.6.	LOD tasarım evrelerinde gereken parametreler	69
Çizelge 3.7.	Tasarım aşamasında farklı LODES tanımları	75
Çizelge 3.8.	BIM tabanlı BEM sürecinin sorunlarına araştırmacılar tarafından yapılan IFC tabanlı çözümler	83
Çizelge 3.9.	BIM tabanlı BEM sürecinin sorunlarına araştırmacılar tarafından yapılan gbXML tabanlı çözümler	88
Çizelge 3.10.	BIM tabanlı BEM için önemli bulgular ve yenilikler	89
Çizelge 5.1.	Önerilen algoritma için tanımlanan giriş parametreleri ve değer aralıkları	107
Çizelge 5.2.	Dış duvarın termal özellikleri	108
Çizelge 5.3.	Soğuk-kuru iklim koşullarına uygun WWR değerleri	112
Çizelge 5.4.	Revit üretken tasarım arayüzü kullanılarak oluşturulan tasarım alternatiflerinin çıktı verileri	118
Çizelge 5.5.	Geliştirilen algoritmadan elde edilen EUI ve Insight Platformu EUI karşılaştırması ve gerçeklik yüzdesi dağılımı	127

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Tez akış şeması 5

Şekil 2.1. Bütünleşik tasarım süreci 8

Şekil 2.2. Her tasarım aşamasında tasarım hedefleri 10

Şekil 2.3. Geleneksel tasarım süreci 14

Şekil 2.4. MacLeamy eğrisi 15

Şekil 2.5. Bina, hücresel otomat üretim sistemini kullanarak yeniden tasarlanan avlu ve sokak morfo-tipolojilerini oluşturur ve sonuçlandırır 27

Şekil 2.6. Autodesk Araştırma Grubu'nun "The Living" projesinin üretken tasarım seçenekleri ve üretken tasarım hedefleri 28

Şekil 2.7. Kentsel mekanlarda, dış yapıda ve cephe tasarımında Voronoi diyagramlarının uygulama örnekleri 29

Şekil 2.8. Evolutionary optimized cellular housing tasarımı için simülasyon motoru (sol), vokselin kentsel çevredeki temsili (sağ) 31

Şekil 2.9. La Malcontenta'nın zemin kat planını oluşturmak için Palladyan dilbilgisi uygulamasının seçilmiş süreçleri 33

Şekil 2.10. LHS ve RHS şekillerini içeren ortak bir şekil kuralı 34

Şekil 2.11. Farklı dönüşüm türlerine dayalı şekil kuralı örnekleri: (a) toplama, (b) çıkarma, (c) bölme, (d) değiştirme ve (e) yerine geçme 34

Şekil 2.12. Farklı etiketler kullanan iki açıklama çeşidi: Harfler (sol) ve noktalar (sağ) 36

Şekil 3.1. Bina bilgi modellemesi tabanlı bina enerji modellemesi sürecine genel bakış 42

Şekil 3.2. Birleşik model 43

Şekil 3.3. Merkezi model yöntemi 45

Şekil 3.4. Uygulama zinciri yöntemi 45

Şekil 3.5. Otomatik enerji simülasyonu için geliştirilmiş bilgisayar aracına genel bakış 46

Şekil 3.6. BIM tabanlı enerji simülasyonu süreci: IFC formatı üzerinden SIMPLEBIM ve IDA-ICE entegrasyonu 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.7. Entegrasyon sürecinin akış şeması 48

Şekil 3.8. Ara yazılım araç yöntemi 49

Şekil 3.9. Değişim gereksinimi 50

Şekil 3.10. Değişim gereksinimlerini tanımlamak için çerçeve 51

Şekil 3.11. BIM'in farklı boyutları 55

Şekil 3.12. Bir konut modeli için Revit'te 3D enerji modeli 56

Şekil 3.13. FormIt web uygulama arayüzü 57

Şekil 3.14. Insight'ta ısıtma yükleri görselleştirmesi 57

Şekil 3.15. ArchiCAD'de konut modeli 58

Şekil 3.16. Bina enerji simulasyonuna genel bakış 62

Şekil 3.17. Enerji simülasyon araçlarının kategorileri 63

Şekil 3.18. Enerji performansı simülasyon araçları için ideal iş akışı 63

Şekil 3.19. Erken tasarım süreci 70

Şekil 3.20. BIM tabanlı BEM sürecin sorunları 73

Şekil 3.21. Farklı tasarım aşamaları 76

Şekil 3.22. GST ve IDF generator çalışma süreci 79

Şekil 3.23. Bina simülasyon modeli üzerinde malzeme özellikleri tanımı için hizmetler ve arayüzler 81

Şekil 3.24. XSLT tabanlı dönüşüm sürecinin çerçevesi 85

Şekil 4.1. BIM tabanlı BEM ve üretken tasarım sürecinde analiz, optimizasyon ve otomatik form oluşturma adımlarını içeren iş akışı 94

Şekil 4.2. Önerilen çerçeve süreci ve süreçte kullanılan araçlar ve uygulamalar 95

Şekil 4.3. Biçim grameri kuralları ile üretilebilecek olası formlar 97

Şekil 4.4. Üretken tasarım için biçim grameri tabanlı algoritma geliştirme 98

Şekil 4.5. Cephe tasarımı için geliştirilen Dynamo algoritmasının akış diyagramı. 99

Şekil 4.6. Modeldeki elemanların kategoriye göre filtrelenmesi, WWR parametresinin okunması, cephe yüzeylerinin ayrıştırılması ve görsel kontrol amacıyla renklendirilmesini içeren algoritma modülü 100

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.7. Dynamo algoritmasının pencere açıklıklarının yerleştirilmesini ve görselleştirilmesini sağlayan modülüne ait görsel 101

Şekil 4.8. Yapı kabuğu bileşenlerinin Dynamo ortamında geometrik olarak tanımlanması, sınıflandırılması ve enerji analizine uygun biçimde işlenmesi süreci 102

Şekil 4.9. Önerilen algoritma kapsamında Dynamo ve Green Building Studio destekli enerji simülasyon süreci 104

Şekil 5.1. Önerilen sürecin ilk aşamasında Üretken Tasarım uygulamasına ait giriş parametrelerinin tanımlandığı arayüz 109

Şekil 5.2. Üretken tasarımda önerilen algoritmanın ilk aşaması için gelişmiş nesil ayarları 111

Şekil 5.3. Üretken tasarım sürecinde elde edilen bina kütlelerinin biçim faktörü ve kat alanına göre görsel ve sayısal analizi 111

Şekil 5.4. Revit ortamında cepheye ait yön ve pencere/duvar oranı (WWR) parametrelerinin tanımlanması 113

Şekil 5.5. Üretken tasarımda önerilen algoritmanın ikinci aşaması için gelişmiş nesil ayarları 114

Şekil 5.6. Üretken Tasarımarayüzünde giriş veriler 115

Şekil 5.7. Üretken Tasarım süreci sonucunda elde edilen tasarım alternatiflerinin enerji performansı, cephe bazlı WWR değerleri ve geometrik değişkenler ile birlikte görselleştirildiği kullanıcı arayüzü 117

Şekil 5.8. Revit Üretken Tasarım arayüzü üzerinden elde edilen kütle alternatifleri .. 120

Şekil 5.9. Üretken Tasarım ortamında seçilen bina kütlelerinin Autodesk Revit'e aktarılmış hali 121

Şekil 5.10. Birinci alternative ait üretilen cephe tasarım alternatifleri, Revit Üretken Tasarımarayüzü ekran görüntüsü 123

Şekil 5.11. Üretken tasarım algoritmasıyla oluşturulan cephe alternatifinin Autodesk Revit ortamında manuel olarak yeniden modellenmiş hali 124

Şekil 5.12. Autodesk Insight platformunda gerçekleştirilen enerji performansı ve karbon analizi 126

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
mm	Milimetre
cm	Santimetre
m	Metre
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
kW	Kilovat
kWh	Kilovatsaat

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
API	Application Program Interface
ASHRAE	Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği
BEM	Building Enerji Modelling
BIM	Building Information Modelling
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
DGNB	German Sustainable Building Council
EUI	Enerji Kullanım Yoğunluğu
GBC	Green Building Certifications
gbXML	Green Building XML
HVAC	Isıtma Soğutma ve Havalandırma Sistemi
IAI	International Association for Interoperability
IDF	Input Data File
IDP	Integrated Design Process
IFC	Industry Foundation Classes
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
WWR	Window-to-Wall Ratio

1. GİRİŞ

Son yıllarda dünya birincil enerji sorunlarıyla karşı karşıya gelmektedir ve yapı sektörü karbondioksit emisyonunun %40'ını oluşturmaktadır. Öte yandan, inşaat sektörü en düşük maliyetle karbon azaltması için en yüksek potansiyele sahiptir. Çevresel sorunların artan farkındalığı ve binaların çevre üzerindeki önemli etkisi nedeniyle verimli enerji kullanımı ve minimum çevresel etkiye sahip sürdürülebilir binalara olan talep artmaktadır (Azhar, Brown ve Farooqui, 2009). Bununla birlikte, yüksek enerji performanslı bina tasarımı çok disiplinli ve karmaşık bir süreçtir ve çoğunlukla mimarlar yeterli uzmanlık ve bilgiye sahip değil (Bazjanac, 2008). Yüksek performanslı tasarım sürecin karmaşıklığı bina geometrisi, mekân yerleşimi, inşaat malzemeleri, analitik özellikler, sahalar, hava durumu verileri, kullanıcı davranışları vb. çok sayıda birbiriyle ilişkili parametrelerden ve ayrıca bina simülasyonu çıktılarının karmaşıklığından kaynaklanır (Nguyen, Reiter ve Rigo, 2014). Bu karmaşıklığın bir sonucu olarak ve mimarların tasarım alternatiflerini keşfetmelerine ve enerji verimliliklerini değerlendirmelerine yardımcı olacak etkin araçların bulunmamasından dolayı, enerji performansının değerlendirmeleri genel olarak tasarımın sonraki aşamalarında yapılır ve bu düşük enerji verimli binaların tasarımına neden olur.

Bina bilgi modellemesinin (BIM) ortaya çıkışı, sıkıcı model hazırlama, model tutarsızlığı ve maliyetli uygulama gibi geleneksel bina enerji modellemesinin sınırlarını aşma fırsatları sağlar ve bina enerji modellemesini (BEM) dijital bina tasarım sürecine sevk eder. Bina tasarımı ve enerji simülasyonu arasındaki entegrasyon eksikliği, bina performans analizinin tasarım sürecinde verimli kullanılmasını önler. Bina performansını değerlendirmek için enerji simülasyon araçlarının kullanılması erken tasarım aşamasında tasarım alternatiflerini karşılaştırmak için kritik öneme sahip olabilir.

Araştırma amacı

Yüksek enerji performanslı yapılı çevrelerde BIM'in potansiyellerinden faydalanarak BEM ile birlikte çalışabilirliğine dayalı sorunların saptanması ve yapılı çevrelerin tasarımlarının ilk aşamalarında kullanılabilir BIM tabanlı BEM süreci oluşturulması ve test edilmesi hedeflenmektedir. Bu amaç, aşağıdaki süreçleri içermektedir:

Bu genel amaca ulaşmak üzere araştırmada şu alt hedefler belirlenmiştir:

- BIM tabanlı mevcut BEM süreçlerinin sistematik olarak sınıflandırılması ve bu süreçlerin erken tasarım aşamasındaki kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi,
- BIM, enerji simülasyonu ve optimizasyon yazılımları arasındaki birlikte çalışabilirlik düzeylerinin incelenmesi ve bu süreçlerde yaşanan entegrasyon sorunlarının tanımlanması,
- Erken tasarımda alınan mimari kararların (örneğin bina biçimi, yüzey alanı, pencere-dış duvar oranı) enerji performansı üzerindeki etkisinin modellenmesi ve analiz edilmesi,
- Tasarım alternatiflerinin çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak tanıyan bir sürecin kurgulanması,
- Elde edilen bulgular doğrultusunda, mimarların erken tasarım aşamasında kullanabileceği BIM tabanlı, enerji performansı odaklı bir yönlendirme çerçevesi (kılavuz) geliştirilmesi.

Bu amaç doğrultusunda geliştirilecek yöntem, hem akademik bilgi üretimine katkı sunmayı hem de uygulayıcılar için pratik, bütünleşik ve karar destekleyici bir araç sunmayı hedeflemektedir.

Araştırma sorusu

Nasıl BIM tabanlı BEM sürecinden yararlanarak yüksek enerji performanslı yapılı çevre modellenmesini erken tasarım sırasında gerçekleştirerek tasarım alternatifleri çok amaçlı optimizasyon yöntemleri yardımıyla BIM tabanlı BEM sürecinde değerlendirilir?

Araştırma sorusuna yanıt bulmak amacıyla aşağıda sıralanan alt araştırma soruları da incelenmiş ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

- Mevcut BIM tabanlı BEM süreçleri hangi kategorilere ayrılabilir ve bu süreçlerin erken tasarım aşamasındaki etkinlikleri nelerdir?
- BIM tabanlı tasarım araçları ile enerji simülasyon ve optimizasyon yazılımları arasında ne tür birlikte çalışabilirlik sorunları yaşanmaktadır ve bu sorunlar nasıl aşılabilir?
- Üretken tasarım yöntemleri, BIM tabanlı BEM süreciyle entegre edilerek tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesinde nasıl kullanılabilir?

- Mimarlara yönelik, enerji verimli erken tasarım kararlarını destekleyen BIM tabanlı bir kılavuz ya da yöntemsel çerçeve nasıl geliştirilebilir ve test edilebilir?

Araştırma hipotezi

Erken tasarım aşamasında verilen tasarım kararları, nihai bina enerji performansı üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Mimarlara, BIM tabanlı bir BEM yönteminin erken tasarım aşaması için geliştirilip erken tasarım aşamasında kullanılması daha enerji etkin tasarıma olanak tanıyabilir. Buna dayanarak BIM tabanlı bir BEM metodu erken enerji etkin tasarımlar için geliştirilebilir ve erken tasarım aşamasında kullanılabilir.

Araştırmanın önemi

Günümüzde yapı sektöründe sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve çevresel etki konuları giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Yapıların enerji tüketiminin önemli bir kısmı tasarım kararlarının alındığı erken aşamalarda belirlenmekte olup, bu aşamalarda alınan kararların bina performansı üzerinde belirleyici olduğu birçok akademik çalışma ile ortaya konmuştur. Bu bağlamda, tasarım sürecine entegre edilebilecek, erken aşamada kullanılabilir ve karar alma süreçlerini yönlendirebilecek dijital araçlara duyulan ihtiyaç artmaktadır.

Bina Bilgi Modellemesi (BIM), mimari tasarım sürecinin yönetimi ve koordinasyonu açısından önemli bir paradigma değişikliği yaratmıştır. Bununla birlikte, Bina Enerji Modellemesi (BEM) ile BIM sistemleri arasındaki entegrasyon hâlen birçok teknik, metodolojik ve operasyonel engelle karşı karşıyadır. Özellikle erken tasarım aşamasında BIM tabanlı BEM süreçlerinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için mevcut araçların birlikte çalışabilirlik düzeylerinin değerlendirilmesi, sınırlılıklarının ortaya konması ve bu doğrultuda yeni yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu araştırma, BIM tabanlı BEM süreçlerinin erken tasarım aşamasında nasıl etkin şekilde kullanılabileceğine odaklanarak, enerji etkin yapı tasarımına katkı sağlamayı hedeflemektedir. Araştırma sonucunda geliştirilecek yöntem ve kılavuzlar, mimarlara erken aşamada daha bilinçli enerji tasarımı kararları alma konusunda destek sağlayarak hem akademik hem de uygulama bağlamında önemli bir boşluğu dolduracaktır. Ayrıca, çok

amaçlı optimizasyon yaklaşımlarının entegrasyonu ile tasarım sürecinde performans odaklı düşünmenin yaygınlaştırılmasına da katkı sunulacaktır.

Bu çalışma, sadece teorik katkı sunmakla kalmayıp, BIM ve BEM tabanlı dijital tasarım yaklaşımlarının uygulamadaki potansiyelini artırarak, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada mimari tasarım disiplinine stratejik bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Araştırmanın yöntemi

Bu araştırmada, yüksek enerji performanslı bina tasarımı sürecine katkı sağlayacak bir BIM tabanlı BEM çerçevesi önerilmiş ve bu çerçevenin mimari tasarımın erken aşamalarında nasıl uygulanabileceği ortaya konmuştur. Geliştirilen yöntem, BIM teknolojileri ile bina enerji modelleme (BEM) sistemlerini entegre ederek, tasarım alternatiflerinin enerji performansına göre karşılaştırılmasını ve çok amaçlı optimizasyon teknikleri yardımıyla en uygun çözümün belirlenmesini hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında önerilen çerçevenin ilk adımında, Autodesk Revit ile entegre çalışan Dynamo yazılımı aracılığıyla, erken tasarım kararlarını yönlendirecek bir parametrik modelleme altyapısı oluşturulmuştur. Dynamo'nun görsel programlama arayüzü ve yerleşik matematiksel modülleri sayesinde, bina kütlesi ve cephe bileşenleri gibi karar değişkenleri tanımlanarak sistemli bir şekilde kontrol edilmiştir. Geliştirilen algoritmalar, bu değişkenleri analiz ederek alternatif tasarımların oluşturulmasına olanak tanımıştır.

Yöntem iki ana aşamadan oluşmaktadır:

Bina kütlesi optimizasyonu: Bu aşamada, biçim faktörü ve toplam kat alanı gibi performans kriterleri tanımlanmış ve bu kriterler doğrultusunda alternatif bina formları biçim grameri kurallarına dayalı olarak parametrik biçimde üretilmiştir. Üretilen varyasyonlar arasından, minimum yüzey alanı/hacim (SA/V) oranı ve maksimum kullanılabilir alan gibi hedeflere göre en uygun form seçilmiştir.

Yapı kabuğu optimizasyonu: Seçilen bina formu üzerinden, yapı kabuğuna ait pencere konumu, boyutu ve geçirgenlik/opaklık oranı gibi parametreler tanımlanarak yeni varyasyonlar oluşturulmuştur. Bu varyasyonlar, gbXML formatında enerji simülasyon

araçlarına aktarılmış ve konum ile iklim verileri dikkate alınarak Enerji Kullanım Yoğunluğu (EUI) en düşük olacak şekilde değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, iteratif bir döngü içerisinde sürekli gözden geçirilerek en uygun tasarım senaryosu belirlenmiş ve gerektiğinde süreç yeniden başlatılmıştır. Bu yaklaşım, enerji verimliliği odaklı tasarım sürecini yapılandırmak ve dijital araçlar yardımıyla daha bilinçli kararlar alınmasını sağlamak üzere sistematik bir yöntem sunmaktadır.

Algoritma tarafından üretilen çok sayıda tasarım alternatifi arasından on farklı örnek model seçilmiştir. Bu modeller, Autodesk Revit ortamında manuel olarak yeniden modellenmiş ve ardından Autodesk Insight Carbon Analysis uygulaması kullanılarak her bir tasarım için Enerji Kullanım Yoğunluğu (EUI) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler, önerilen algoritmanın enerji simülasyonu aşamasında elde ettiği EUI değerleri ile karşılaştırılmış ve aralarındaki tutarlılık analiz edilmiştir.

Bu karşılaştırma, önerilen BIM tabanlı BEM çerçevesinin enerji performansına yönelik öngörülerinin güvenilirliğini test etmek ve algoritmanın doğruluğunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.1. Tez akış şeması

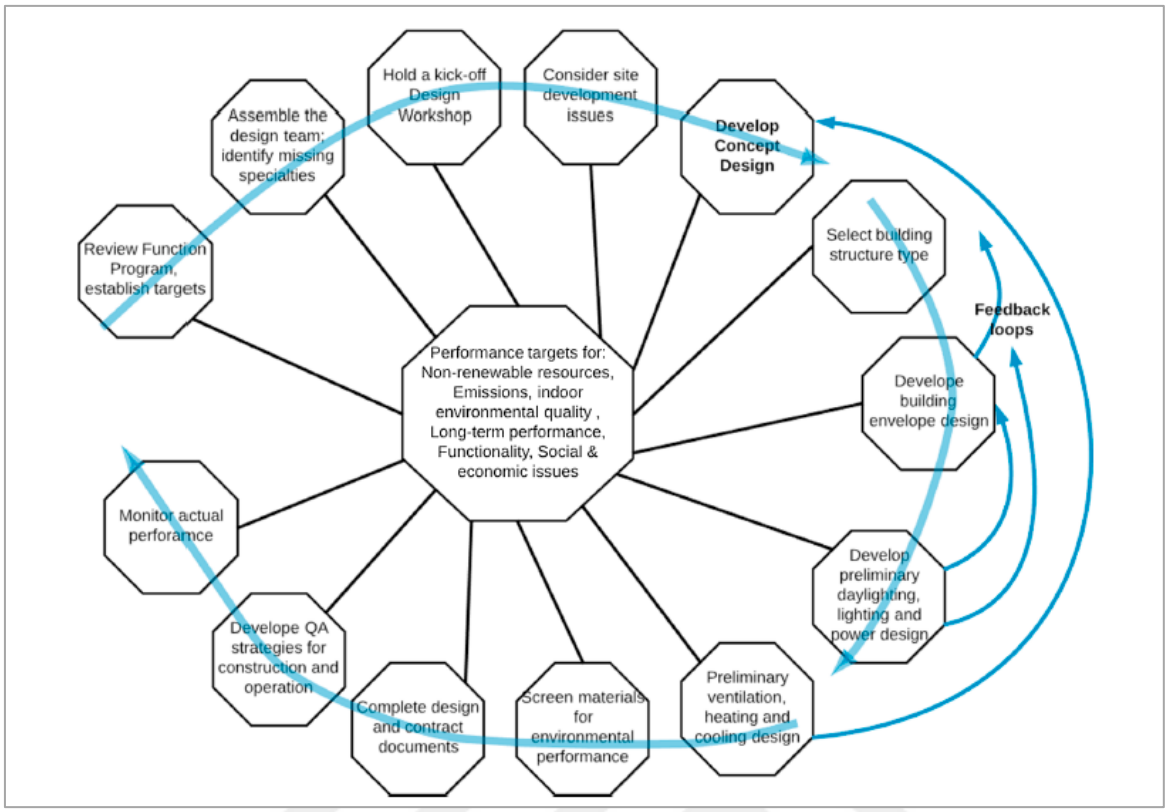
2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Bina Tasarım Süreci

Tasarım süreci, gereksinim programının oluşturulması, kavram geliştirme, detaylandırma ve teknik dokümantasyonun hazırlanması gibi bir dizi kritik aşamayı kapsayan sistematik bir yaklaşımdır. Bu aşamaların her biri, nihai ürünün belirlenen gereksinimlere ve kullanıcı ihtiyaçlarına uygun olmasını sağlamak için hayati bir rol oynamaktadır.

Bina tasarım süreci, genellikle dört temel aşamada ilerlemektedir: konsept tasarımı, ön tasarım, gelişmiş tasarım ve detaylı tasarım. Her aşama, projenin hedefleri ve tasarım gereksinimlerinin daha kapsamlı ve ayrıntılı bir şekilde ele alınmasına olanak tanımaktadır.

Pek çok tasarım firması, genellikle "geleneksel tasarım süreci" olarak adlandırılan bir yaklaşımı benimsemiştir. Bu süreç, tasarım ekibinin proje ekibine aşamalı ve ardışık katkılarda bulunması nedeniyle genellikle doğrusal bir yapıya sahiptir (Larsson, 2009). Ancak, bu geleneksel tasarım süreci, tasarım ekibi üyeleri arasında sınırlı etkileşim ve ayrı çalışma biçimine zemin hazırlamıştır. Bu durum, özellikle detaylı tasarım aşamasında ve sonraki süreçlerde katkı seviyelerinin azalmasına yol açarak tasarımın bütüncül bir şekilde gelişimini olumsuz etkilemiştir (Gao, Koch ve Wu, 2019). Bu tasarım süreci, genellikle mimar ve müşteri tarafından kabul edilen bir tasarım konsepti ile başlar. Bu tasarım konseptine dayanarak, mühendislerden (temel olarak inşaat, yapı, teknik ve elektrik mühendisleri dahil) tasarım yapmaları ve uygun sistemler önermeleri istenir (Bragança, Vieira ve Andrade, 2014). Bu şekilde, mühendisler enerji verimliliği için genellikle optimal olmayan girdiler sağlar; çünkü mimar ve müşteri tarafından kabul edilen tasarım konsepti ile sıkı sıkıya bağlıdırlar (Zimmerman, Eng ve Housing Corporation, 2006). Ek olarak BEM gibi bina simülasyonları genellikle bütçe ve zaman kısıtlamaları ile enerji modellemesi için mevcut girdilerin kısıtlamaları nedeniyle önceki tasarım sürecine dahil değildir. Sonuç olarak, düşük performans ve yüksek işletme maliyetleri tasarım sırasında ortaya çıkar. Her ne kadar mühendisler daha sonraki bir tasarım aşamasında bina simülasyonu yardımıyla gelişmiş ve yüksek performanslı sistemler önerebilse de, bu aşamada yüksek performanslı sistemlerin tanıtılması, ilk zayıf tasarım kararlarının getirdiği kusurların üstesinden gelmeyebilir (Larsson, 2009).



Şekil 2.1. Bütünleşik tasarım süreci (Larsson, 2009)

Geleneksel tasarım sürecinin sorunlarını aşmak için, Bütünleşik Tasarım Süreci (IDP)[1], Şekil 2.1'de gösterildiği gibi tanıtılmış. Bütünleşik Tasarım Süreci'nin radikal olarak yeni unsurlar içermediği, ancak geleneksel tasarım süreciyle karşılaştırıldığında, kanıtlanmış sistemli bir bütünsel yaklaşımı entegre ettiği bulunmuştur. (Larsson, 2009). IDP'nin iki önemli geliştirmesi, iş hacminin önceki tasarım aşamasına ileriye kayması ve sırasıyla bina tasarım sürecinde bir dizi yinelemeli aktivite döngüsüdür (Serginson, Mokhtar ve Kelly, 2013). Bu gelişmeler, Şekil 2.5'te açıkça gösterilmektedir. Düzenli görevlerin yanı sıra, multidisipliner bir tasarım ekibi oluşturulur, eksik özellikler tanımlanır ve başlangıç tasarımı atölyesi, konsept belirten bir şekilde hazırlanarak bekletilir. Bina tasarımı sürecinde, bina yapısı, bina kabuğu, HVAC sistemi, aydınlatma, günışığı gibi tasarım kararları doğrusal bir şekilde alınmamaktadır. Daha gelişmiş bir yaklaşımda, bu tasarım kararları bir dizi geri bildirim döngüsü aracılığıyla belirlenir; bu döngüler, multidisipliner tasarım ekibinin ortak çalışmalarını içermektedir. Ayrıca, performans hedefleri tüm tasarım süreci boyunca tasarım ekibi tarafından dikkate alınmaktadır. Genellikle, mimar, inşaat, makine ve elektrik mühendisleri ile enerji uzmanı dahil olmak üzere tüm multidisipliner tasarım ekibi üyeleri,

[1] Integrated Design Process

her faaliyet döngüsünde en uygun kararları vermek için iş birliği içinde çalışmaktadır. Bütünleşik tasarım sürecinde, mimar, tek bir form tasarımcısı olmanın ötesinde, diğer tasarımcılardan gelen girdileri dahil etmek ve uzlaştırmak için bir ekip lideri rolü üstlenir; mühendislerin, yalnızca tasarım çalışması yapmakla kalmayıp, erken tasarım aşamasında tasarım konsepti hakkında fikir vermesi için inisiyatif almaları beklenmektedir. Ek olarak, hesaplama simülasyonları yalnızca tasarımın son aşamasında doğrulama ve sunum amacıyla kullanılmamakta, aynı zamanda tasarım ekibinin tasarım süreci boyunca çeşitli tasarım seçeneklerini ve teknolojik sistemleri karşılaştırmasını sağlamak ve optimize edilmiş tasarım kararlarını desteklemek için tasarım destekli bir araç olarak işlev görmektedir (Zimmerman, 2006). Genel olarak, IDP doğrusal bir yapının karşısındaki yinelemeli bir yapı olarak tanımlanabilir; esnek bir yöntem; önceden belirlenmiş olmayan bir yaklaşım; ve önceden öğrenilmiş bir olaylar dizisi değil, devam eden öğrenme ve ortaya çıkma özelliğine sahip yinelemeli bir süreçtir (Zimmerman, 2006). Geleneksel tasarım süreci ile IDP arasındaki farklılıklar Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. IDP'nin faydaları iki yönden sonuçlanabilir: biri çevresel performansın iyileştirilmesi, diğeri ise işlevsel programdaki gelişimidir (Larsson, 2009).

Çizelge 2.1. IDP ve geleneksel tasarım süreci arasındaki farkı (Kumar, 2008)

Bütünleşik Tasarım Süreci	Geleneksel Tasarım Süreci
• Çekirdek ekip üyeleri en başından beri katılıyor • Geniş takımın etkilediği kararlar • Yinelemeli süreç • Bütün sistem düşünme • Tam optimizasyona izin verir • Sinerji istiyor • Yaşam döngüsü maliyetlemesi • Tüm yaşam döngüsü süreci	• Sadece ekip üyelerini dahil eder • Erken aşamada daha az zaman, enerji ve iş birliği sergilendi • Daha az insandan etkilenen daha fazla karar • Doğrusal süreç • Sistemler genellikle ayrı düşünülmelidir • Optimizasyonlar sınırlıdır • Sinerji için azalan fırsat • Ön maliyetlere vurgu • Süreç genellikle inşaat bittiğinde sonlandırılır

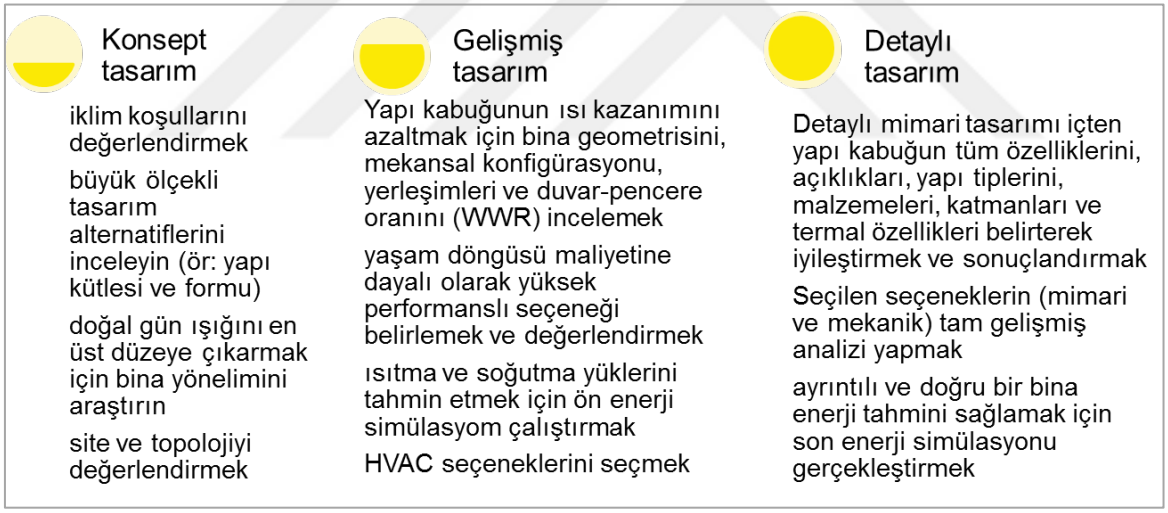
2.1.1. Ulusal standartlara (AIA, RIBA, HOAI) göre bina tasarım aşamaları

Bina tasarım süreci, tasarım aşamalarından oluşur. Bu aşamaların her birinin kendi tanımlanmış görev ve sorumlulukları vardır. Bazen bu aşamalar belirli müşteri ihtiyaçlarını karşılamak için özel olarak hazırlanır; ancak çoğunlukla bunlar, başarılı bir proje için stratejik bir yapı oluşturmak üzere standartlaştırılır (Svalestuen ve diğerleri, 2018). Bu tasarım aşamalarının yönetimi, bir proje yöneticisi için en kritik görevlerden biridir. Proje

paydaşları inşaat sürecini anlamalıdır. Yapım süreci boyunca aşama bağımlılıkları değişiklik gösterdiğinden verimli bir projeye sahip olmak için her aşamanın ayrıntılı olarak planlanması gerektiğine dikkat edilmelidir (Knotten, 2015).

Yüksek performanslı binalar için bina tasarım süreci, her tasarım aşamasında profesyoneller tarafından alınması gereken bir dizi faaliyet ve karar içerir. Genel olarak, yeni bir bina projesinin tasarım süreci üç aşama içerir: konsept tasarımı (veya program ön tasarımı), gelişmiş tasarım (veya şematik tasarım) ve detaylı tasarım; bunlar, ilgili bileşen aktiviteleri ile birlikte Şekil 2.2'de açıklanmaktadır.

Tasarım sürecinin her aşamasında, tasarım hedeflerine ulaşmak için ve enerji simülasyonu çalıştırmak için BIM-BEM yürütülebilir. Tasarım sürecine bir BIM-BEM prosedürünün yerleştirilmesi, paylaşılan bir ortamda optimize edilmiş bir tasarıma yönelik birden fazla yineleme olanağı sunar.



Şekil 2.2. Her tasarım aşamasında tasarım hedefleri

Halihazırda inşaat projesi yaşam döngüsü yönetimi için büyük ölçüde kullanılan ulusal standartlar sırasıyla AIA[1], RIBA[2] ve HOAI[3]'dir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) mimarlar için profesyonel bir dernek olan American Institute of Architects (Group), tasarımın aşamalarını, projenin çalışmalarını parçalamak ve mimarlar ile diğer tasarım

[1] American Institute of Architects
[2] Royal Institute of British Architects
[3] Honorarium Regulations for Architects and Engineers (German: Honorarordnung für Architekten und Ingenieure).

paydaşlarının takip etmesi için bir standart olarak tanımlar. AIA'ya göre tasarım aşamaları, tasarım sürecinin çerçevesidir (AIA, 2013).

Birleşik Krallık'ta (İngiltere) profesyonel bir dernek olan Kraliyet İngiliz Mimarlar Enstitüsü (RIBA), inşaat projelerinin yaşam döngüsündeki çeşitli süreçleri standartlaştıran belgeleri tanımlamakta ve yayımlamaktadır (Davies ve Davies, 2020). Mimarlar ve Mühendisler için Onursal Düzenlemeler (HOAI), mimarlar ve mühendisler için ücret düzenlemelerini farklı tasarım aşamalarına göre standart hale getirmek için Almanya tarafından çıkarılan federal bir yasadır.

Çizelge 2.2. AIA, RIBA ve HOAI'yi takip eden tasarım aşamalarının karşılaştırılması (Srivastava, 2021)

<table>
<tr><td>Plan of Work</td><td colspan="8">Corresponding Design Phases of American, British and German Architects Plan of Work</td></tr>
<tr><td rowspan="2">The American Institute of Architects (AIA)</td><td rowspan="2">0
Project Brief</td><td rowspan="2">1
Pre-Design</td><td rowspan="2">2
Schematic Design</td><td rowspan="2">3
Design Development</td><td rowspan="2">4 Construction Documents</td><td rowspan="2">5
Bidding</td><td rowspan="2">6
Construction</td><td>7 commissioning</td></tr>
<tr><td>8
Occupancy</td></tr>
<tr><td>Royal Institute of British Architects (RIBA)</td><td>0
Strategic Definition</td><td>1
Pre paration</td><td>2
Concept Design</td><td>3
Design Development</td><td>4
Technical Design</td><td>5
Construction</td><td>6
Handover and Closeout</td><td>7
In Use</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Honorarordnungfür Architekten und Ingenieure (HOAI)</td><td rowspan="2">0
-</td><td rowspan="2">1
Fundament al Evaluation</td><td rowspan="2">2
Preliminary and Design</td><td rowspan="2">3
Final Design</td><td rowspan="2">4
Planning Permission Application</td><td rowspan="2">5
Execution Planning</td><td>6
Preparation of contract Award</td><td>8
Project construction, supervision and documentation</td></tr>
<tr><td>7 Involvement in Contract Award</td><td>9
Post Completion Services</td></tr>
</table>

Çizelge 2.2, farklı tasarım aşamalarıyla ilgili çalışma planlarına göre üç farklı ulusal standardı (ABD, İngiltere ve Almanya) karşılaştırmaktadır. Tasarım aşamalarının benimsenmesi ve sorumluluklardaki farklılıklara rağmen, her üç standardın da erken aşamalarının, gereksinimlerin ve çıktıların tutarlı bir şekilde anlaşılmasıyla neredeyse benzerlik gösterdiği vurgulanmalıdır.

Bina tasarım aşamaları ve yeşil bina sertifikaları (LEED, BREEAM ve DGNB)

Tasarım aşamaları, sürdürülebilir bir bina sağlamada çok önemli olan tasarım sürecinin çerçevesidir. Enerji verimli bir bina elde etmek için tasarımın erken aşamalarında sürdürülebilir yeşil hedefleri tanımlamak hayati önem taşır. Bunun için benimsenen

yaklaşım geleneksel yaklaşım gibi değildir; bu nedenle, kararlar tasarım aşamalarına başlamadan önce alınmalıdır.

Sürdürülebilir kalkınmayı gerçekleştirmenin sayısız yolu vardır; bunlardan biri, piyasada mevcut olan sürdürülebilir Yeşil Bina Sertifikalarına (GBC[1]) göre binaların sertifikalandırılmasıdır. Bunlardan en çok kullanılanları Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik (LEED[2]), Bina Araştırma Kuruluşu Çevresel Değerlendirme Metodolojisi (BREEAM[3]), Alman Sürdürülebilir Bina Konseyi (DGNB[4]) (Zimmerman, 2006). Aşağıda verilen Çizelge 2.3, şemalara, derecelendirmelere ve benimsenecek sürece dayalı olarak farklı ulusal standartları karşılaştırmaktadır.

Çizelge 2.3. Şemalar, derecelendirmeler ve sürece dayalı farklı GBC'nin karşılaştırılması (Srivastava, 2021)

	LEED	BREEAM	DGNB
Building type (schemes)	New buildings (Residential) New buildings (Commercial) Interiors (Residential) Interiors (Commercial) Renovations (Residential) Renovations (Commercial) Existing (Residential) Existing (Commercial) Urban areas (Residential and commercial)	New buildings (Residential) New buildings (Commercial) Interiors (Residential) Interiors (Commercial) Renovations (Residential) Renovations (Commercial) ..... Existing (Commercial) Urban areas (Residential and commercial)	New buildings (Residential) New buildings (Commercial) Interiors (Commercial) Renovations (Residential) Renovations (Commercial) Existing (Residential) Existing (Commercial) Urban areas (Residential and commercial)
Ratings	Platinum (+80 pt) Gold (+60 pt) Silver (+50 pt) Certified (+40 pt)	Outstanding (+85%) Excellent (+70%) Very good (+55%) Good (+45%) Pass (+30%) Acceptable (-30%)	Platinum (80%) Gold (65%) Silver (50%) Bronze (35%)
Process (Process varies depending on certification scheme used)	1. Submission of design phase documents to certification body for approval. 2. Submission of construction phase documents to certification body for approval.	1. Selection of Typology 2. Addition of an assessor to guide documentation 3. Submission to certification body for approval	1.Project online registration (online navigator assessment) 2. Addition of an assessor to guide documentation 3. Submission to certification body for approval

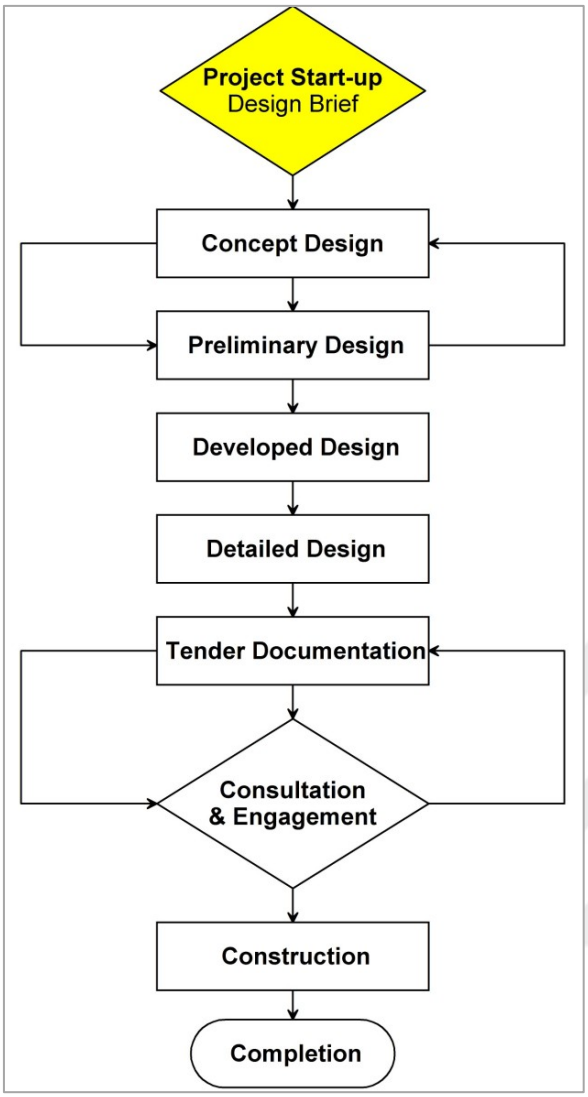
Yapılan araştırmalara göre, farklı ülkelerde inşaat sürecine yönelik standartlaştırılmış bir yaklaşım yoktur. Ancak, ilk aşamalardaki görevler ve gereksinimler hemen hemen aynıdır.

[1] Green Building Certifications
[2] Leadership in Energy and Environmental Design
[3] Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
[4] German Sustainable Building Council

Ek olarak, GBC sertifikalarını elde etmek için tasarım aşamasında enerji hedeflerini erken anlamak ve uyarlamak önemlidir.

2.1.2. Bina tasarım sürecindeki aşamalar

Konsept Tasarımı: Bu ilk aşamada, proje hedefleri tanımlanmakta ve saha geliştirme, bina oryantasyonu, kütle ve form gibi genel yapı unsurlarına yönelik ilk kararlar verilmektedir. Aynı zamanda bina hizmetleri ve yapı sistemi gibi temel unsurlar da bu aşamada belirlenmektedir. Ön Tasarım: Konsept tasarımda belirlenen ilk fikirlerin geliştirilmesi bu aşamada gerçekleştirilir. Yapı kabuğunun enerji verimliliği, gün ışığı ve ısı performansı gibi kriterler doğrultusunda detaylandırılması; yapı sistemleri, aydınlatma, akustik ve termal konfor tasarımı ile HVAC seçeneklerinin gözden geçirilmesi gibi unsurlar bu aşamanın temel odak noktalarıdır. Geliştirilen Tasarım: Ön tasarımda ortaya konulan konseptin daha ileri düzeyde ele alındığı bu aşamada, bina kabuğu detaylandırılması, mekan yerleşimi, iklimlendirme ve havalandırma sistemlerinin entegrasyonu yapılır. Yapısal, elektrik, hidrolik ve yangın güvenliği sistemlerinin bütünleşik tasarımı da bu aşamada tamamlanır. Detaylı Tasarım: Geliştirilen tasarım aşamasında elde edilen çıktılar, detaylandırılarak inşaat dokümantasyonu ve uygulama gereklilikleri oluşturulur. Aynı zamanda detaylı termal, gün ışığı ve enerji modellemeleri uygulanarak tasarımın performans değerlendirmesi yapılır (Gao, Koch, 2019).

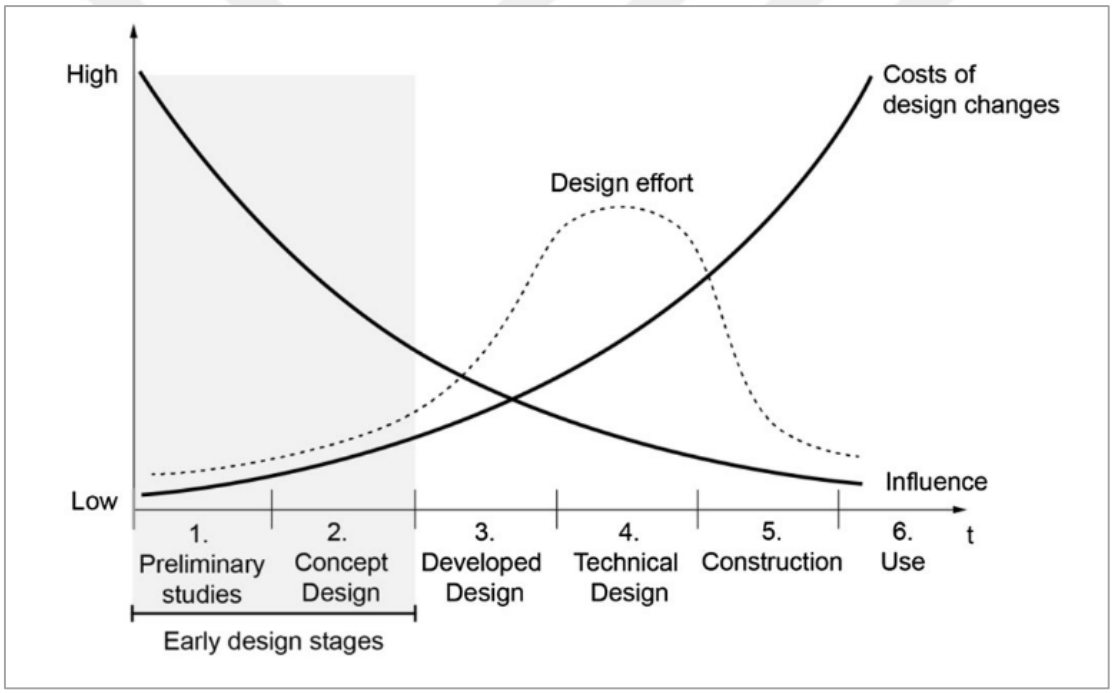


Şekil 2.3. Geleneksel tasarım süreci (Gao, Koch, 2019)

2.2. Erken Tasarım Aşamasının Getirdiği Avantajlar

Konsept tasarım aşaması, erken tasarım evresi olarak da adlandırılır ve proje hedeflerinin, tasarım gereksinimlerinin, saha geliştirme planlarının ve ilk mimari konseptlerin analiz edildiği ve belirlendiği süreçtir. Bu aşama, tüm bina tasarımları için kritik bir öneme sahiptir. (Gao, Zhang, Koch ve Wu, 2019). Bu aşamada alınan kararlar, bina enerji performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin, binanın formu ve yönelimi doğru bir şekilde tasarlandığında, herhangi bir ek maliyet olmaksızın binanın enerji tüketimi %30-40 oranında azaltılabilir (Elbeltagi, Wefki, Abdrabou, Dawood ve Ramzy, 2017). Literatürde birçok araştırmacı, yüksek performanslı binalar elde etmek amacıyla bina performans simülasyon araçlarının erken tasarım aşamasına entegre edilmesi gerektiğini öne sürmektedir (Gao, Zhang, 2019). Binalarda maksimum enerji tasarrufunun sağlanabilmesi için enerji

simülasyonlarının erken tasarım sürecine dahil edilmesi elzemdir. Bina performansını doğrudan etkileyen form, yönelim, pencere/duvar oranı (WWR) ve yapı malzemeleri gibi tasarım kararları, genellikle bu aşamada verilmektedir (Elbeltagi, 2017). Ancak, bina enerji simülasyonu araçları bu aşamada nadiren kullanılmaktadır. Bunun başlıca nedenleri arasında, geleneksel bina enerji simülasyonlarının yeşil bina sertifikalarına uygunluğu değerlendirmek veya tasarım tamamlandıktan sonra enerji verimliliğini tahmin etmek amacıyla kullanılması (Hemsath, 2013) ve bu simülasyonların maliyetli ve zaman alıcı olması yer almaktadır (Bambardekar ve Poerschke, 2009). Ayrıca mevcut bina enerji simülasyon araçlarının çoğu, özellikle konsept tasarımının başlıca sorumlusu olan mimarlar tarafından erken tasarım aşamasında kullanılamayacak kadar yetersizdir (Elbeltagi, 2017).



Şekil 2.4. MacLeamy eğrisi (Hollberg, Lichtenheld, Klüber, Ruth ve Environment, 2018; Paulson Jr, 1976)

İlk aşamada bina tasarımı, mimarların sorumluluğunda olan bina kabuğu, yönelim ve kütle gibi temel tasarım parametrelerine odaklanmaktadır. Geleneksel tasarım süreçlerinde, bu temel parametreler genellikle bina enerji modellemesi (BEM) yoluyla sağlanan enerji performansı geri bildirimlerine dayalı olarak değil, mimarların önceki deneyimleri, genel tasarım ilkeleri ve ilgili düzenlemelere uygunluk doğrultusunda belirlenmektedir. (Bambardekar ve Poerschke, 2009). Bu nedenle, mimarlık alanında erken tasarım aşamasında kullanılabilecek bir enerji analiz aracı geliştirilmesi gerekmektedir. Önerilen

aracın kullanıcı dostu olması ve tasarım seçeneklerinin enerji tüketimine olan etkilerini açık ve anlaşılır bir şekilde gösterme yeteneğine sahip olması önemlidir. Ayrıca bu modelin enerji modellemesinin yinelemeli bir süreç olduğu göz önünde bulundurularak, farklı tasarım alternatiflerini hızla üretebilme kapasitesine de sahip olması gerekmektedir (Group, 2012).

Şekil 2.4'te sunulan MacLeamy Eğrisi, erken tasarım aşamasında alınan kararların görece düşük maliyetlerle gerçekleştirilebildiğini, bununla birlikte enerji verimliliği üzerinde olumlu etkiler yarattığını ve bina performansını anlamlı ölçüde artırabildiğini ortaya koymaktadır (Echenagucia, Capozzoli, Cascone ve Sassone, 2015). Bu aşamada alınan kararların %20'si, tüm tasarım sürecindeki kararların %80'ini etkilemektedir (Bogenstätter ve Information, 2000). Bunun temel nedeni, erken tasarım kararlarının sonraki tasarım süreçlerine dair genel koşulları belirlemesidir (Hollberg, 2018). Örneğin, erken tasarımda belirlenen pencere/duvar oranı sonraki aşamalarda aydınlatma tasarımını doğrudan etkileyecektir. Ayrıca bina tasarım optimizasyonunun en büyük potansiyeli bu aşamada ortaya çıkar; zira erken tasarımın etkisi en yüksek düzeydedir ve tasarım değişikliklerinin maliyeti bu aşamada en düşüktür (Ahuja, Chopson, Haymaker ve Augenbroe, 2015). Dolayısıyla, bina enerji performansı büyük ölçüde erken tasarım aşamasında şekillenmektedir. Bina enerji modellemesi (BEM) uygulamalarının, simülasyon uzmanları ve mimar olmayan diğer profesyoneller tarafından erken tasarım aşamasında kullanılması, enerji verimli bina tasarımlarına ulaşılmasını sağlamaktadır (Bambardekar ve Poerschke, 2009). Bununla birlikte, BEM erken tasarım aşamasında nadiren kullanılır (Negendahl, Nielsen ve Buildings, 2015). Bu durumun başlıca sebepleri arasında, erken tasarım kararlarının birincil olarak enerji performansına değil, müşteri tercihleri ve estetik kaygılara odaklanması (Ahuja, 2015); bütçe ve zaman kısıtlamalarının BEM kullanımını özellikle küçük projelerde sınırlandırması (Bambardekar ve Poerschke, 2009); ve tasarım ekibinin lideri olan mimarların enerji modelleme sürecine dair sınırlı bilgiye sahip olması yer almaktadır (Group, 2012).

2.3. Bina Tasarım Süreci Yöntemleri

Bina tasarım süreçleri, mimarlık ve mühendislik alanlarında ve her biri kendine özgü nitelikler ve uygulama alanlarına sahip çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Geleneksel, parametrik, modüler, adaptif ve üretken tasarım yöntemleri, her biri farklı avantajlar ve uygulama alanları sunarak tasarım hedeflerine ulaşmak için kullanabilecekleri

bir dizi yaklaşımı temsil etmektedir. Bu yöntemlerin karşılaştırılması, enerji verimliliği açısından hangi yaklaşımın daha etkili olduğunu anlamak için kritik öneme sahiptir.

Geleneksel tasarım yöntemleri, genellikle tasarımcının geçmiş deneyimlere ve standartlara dayanarak oluşturduğu doğrusal bir yaklaşımla tanımlanımaktadır. Bu yöntemler, belirli bir yapı türü için önceden belirlenmiş kurallar ve standartlar çerçevesinde çalışmaktadır. Ancak, bu yöntem esnekliği sınırlıdır ve değişen çevresel koşullara uyum sağlamakta zorlanabilir (Belek ve Yamaçlı, 2023; Zengin ve Yamaçlı, 2023). Parametrik tasarım, değişkenlerin ve parametrelerin tanımlanmasıyla daha dinamik bir süreç sunmaktadır. Bu yöntem, tasarımın çeşitli aşamalarında hızlı değişiklikler yapmayı mümkün kılarak, enerji verimliliği için optimize edilmiş çözümler geliştirilmesine olanak tanır (Gülaçmaz, Başdemir ve Gülaçmaz, 2022). Bununla birlikte, tasarım unsurları arasındaki ilişkileri tanımlamak için algoritmalar kullanır ve mimarların karmaşık formlar oluşturmasını ve enerji verimliliği dahil olmak üzere performans ölçütlerini optimize etmesini sağlar (R. Yu ve Gero, 2016; M. Zhang, 2020). Ancak, parametrik tasarım esnekliği ve yanıt verme kabiliyetini artırsa da hâlâ önemli ölçüde manuel girdi ve denetim gerektirir; bu durum, hızla gelişen tasarım senaryolarında verimliliğini sınırlayabilir.

Modüler tasarım, önceden üretilmiş bileşenlerin bir araya getirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu yöntem, inşaat süresini kısaltabilir ve maliyetleri düşürebilir. Ancak, modüler tasarımın enerji etkinliği, kullanılan malzemelerin ve bileşenlerin kalitesine bağlıdır (Gökçeoğlu ve Değer, 2023). Diğer yandan verimliliği teşvik eder ve inşaat süresini ve maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir (J. Lee, Park, Lee, Kim ve Hyun, 2015; Li, 2018). Ayrıca modüler bileşenlerin katı yapısı, daha akışkan yöntemlere kıyasla yaratıcı tasarım olanaklarını sınırlayabilir.

Adaptif tasarım, çevresel değişikliklere yanıt verebilen sistemler geliştirmeyi hedefler. Bu yaklaşım, bina performansını iyileştirmek ve enerji verimliliğini artırmak için geri bildirim mekanizmalarını entegre eder (Petráková ve Šimkovič, 2023). Dinamik kontrollü cephe sistemleri gibi uygulamalar, enerji verimliliğini artırmak için çevresel koşullara uyum sağlayabilir (Yaman ve Arpacıoğlu, 2021). Bu tür sistemler enerji tüketimini optimize etme potansiyeline sahiptir çünkü iç mekan konforunu artırırken dış ortam koşullarına da yanıt verir; ancak genellikle sofistike teknolojiler gerektirir ve uygulaması karmaşık olabilir. Bu durum, onu birçok proje için daha az erişilebilir kılar.

Üretken tasarım, algoritmalar ve yapay zeka kullanarak tasarım sürecini otomatikleştiren bir yaklaşımdır. Bu yöntem, çok sayıda tasarım alternatifini hızlı bir şekilde değerlendirme ve en uygun çözümü bulma yeteneğine sahiptir (Demir ve Tanyıldızı, 2017). Enerji verimliliği gibi belirli hedefler girilerek üretken tasarım bu kriterleri karşılayan birçok tasarım alternatifini üretip performans ölçütleri (örneğin, termal konfor ve enerji tüketimi) açısından optimize edebilir (Zang ve Ding, 2024). Bu yöntem, tasarım sürecini hızlandırmakla kalmaz; aynı zamanda geleneksel veya parametrik yöntemlerle hemen fark edilmeyebilecek yenilikçi formların ve çözümlerin keşfedilmesine de olanak tanır. Yapay zekanın entegrasyonu üretken tasarım sürecini, bina performansını ve sürdürülebilirliği değerlendiren öngörü yetenekleriyle daha da geliştirir (Chen, 2023).

Bu yöntemler karşılaştırıldığında üretken tasarım enerji verimli tasarım süreçleri için en etkili yöntem olarak anlaşılmaktadır. Belirli performans kriterlerine dayalı olarak tasarımı otomatikleştirme ve optimize etme yeteneği mimarların yaratıcı unsurlara odaklanmasına olanak tanırken, enerji verimliliğinin tasarımın temel bir bileşeni olmasını sağlamaktadır. Üretken tasarımın uyarlana bilirliği ve çoklu tasarım alternatiflerini keşfetme verimliliği, sürdürülebilirliğin ön planda olduğu çağdaş mimari zorluklar için onu özellikle uygun kılmaktadır (Wei, Choi ve Lei, 2022).

Sonuç olarak, geleneksel, parametrik, modüler ve adaptif tasarım yöntemlerinin her biri kendi güçlü yönlerine sahip olsa da, üretken tasarım enerji verimli binalar oluşturma konusunda benzersiz avantajlar sunmaktadır. Hesaplama yetenekleri ve performans optimizasyonuna odaklanması, onu sürdürülebilir mimari arayışında önde gelen bir yaklaşım haline getirmektedir.

2.4. Üretken Tasarım

Üretken tasarım (generative design) yüksek enerji verimliliğine sahip bina tasarımı arayışında öne çıkan bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu metodoloji, enerji performansını optimize etmek amacıyla tasarım olanaklarının geniş bir yelpazesini keşfetmek için gelişmiş hesaplama tekniklerinden yararlanır. Mimari sürecin erken aşamalarında enerji verimliliğini sağlamak için alınan kritik kararların önemi göz ardı edilemez. Echenagucia ve diğerleri, erken tasarım aşamasının bina kabuklarının enerji performansını belirlemek açısından kritik olduğunu vurgulamakta ve ısıtma, soğutma ve

aydınlatma enerji performansını dikkate alan çok amaçlı aramaların gerekliliğini öne çıkarmaktadır (Echenagucia, 2015). Bu, Rafiei ve Adeli'nin net sıfır enerjili binalara ulaşmanın, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve bina kabuğu enerji optimizasyonunun baştan itibaren dikkate alınmasını gerektiren kapsamlı bir yaklaşımı gerektirdiği bulgusuyla örtüşmektedir (Rafiei ve Adeli, 2016).

Yapı Bilgi Modellemesi'nin (BIM) üretken tasarım sürecine entegrasyonu, enerji verimliliğini daha da artırır. BIM, bina performansının simülasyonunu kolaylaştırarak tasarımcıların çeşitli enerji verimli stratejileri ve malzemeleri bütüncül bir şekilde analiz etmelerine olanak tanır. Wong ve Fan, BIM'in sürdürülebilir bina tasarımına nasıl katkıda bulunduğunu ve enerji verimliliğinin tasarım süreci boyunca öncelikli olarak ele alınmasını sağladığını tartışmaktadır (Wong ve Fan, 2013). Ayrıca Lim ve diğerleri, genetik algoritmaların BIM çerçeveleri içinde bina kabuğu tasarımlarını optimize etmek için nasıl kullanılabileceğini ve böylece sürdürülebilirlik sonuçlarını iyileştirdiğini göstermektedir (YW Lim, Majid, Samah, Ahmad ve Ossen, 2018). Bu teknoloji entegrasyonu sadece tasarım sürecini kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilecek yenilikçi çözümleri de teşvik eder.

Bunun yanında adaptif tasarım kavramı, binalarda yüksek enerji verimliliğine ulaşmada önemli bir rol oynar. Mésároš ve diğerleri, adaptif tasarım uygulamalarının, bina performansını etkileyebilecek inşaat sahalarının ve çevresel koşulların dinamik doğasını ele almak için gerekli olduğunu vurgulamaktadır(Mésároš, Spišáková, Mandičák, Čabala ve Oravec, 2021). Bu uyarlanabilirlik, değişen koşullara yanıt veren sürdürülebilir malzemelerin ve tasarım stratejilerinin dahil edilmesine olanak tanır ve nihayetinde enerji verimliliğini artırır. Ayrıca mevcut binaların yenilenmesi, enerji performansını artırmak için hayati bir stratejidir. El-Darwish ve Gomaa, bina kabukları için etkili yenileme stratejilerini ortaya koyarak mevcut yapıların modern enerji standartlarını karşılayabilme potansiyelini göstermektedir (El-Darwish ve Gomaa, 2017).

Üretken tasarım, yüksek enerji verimliliğine sahip bina tasarımı arayışında öne çıkan bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu metodoloji, enerji performansını optimize etmek amacıyla tasarım olanaklarının geniş bir yelpazesini keşfetmek için gelişmiş hesaplama tekniklerinden yararlanır. Mimari sürecin erken aşamalarında enerji verimliliğini sağlamak için alınan kritik kararların önemi göz ardı edilemez. Echenagucia ve diğerleri, erken tasarım

aşamasının bina kabuklarının enerji performansını belirlemek açısından kritik olduğunu vurgulamakta ve ısıtma, soğutma ve aydınlatma enerji performansını dikkate alan çok amaçlı aramaların gerekliliğini öne çıkarmaktadır (Şanlıer, Börklü ve Eldem, 2021). Bu süreç, yükler, malzeme ve imalat yöntemleri gibi faktörlerin belirlenmesiyle başlar ve bilgisayar ortamında birçok tasarım varyantının elde edilmesini sağlar.

Sonuç olarak, BIM gibi ileri teknolojiler ve adaptif tasarım ilkeleriyle birleştirildiğinde, üretken tasarım yüksek enerji verimliliğine sahip binalar yaratmak için güçlü bir çerçeve sunar. Erken tasarım aşamasına odaklanarak, hesaplama araçlarından yararlanarak ve adaptif stratejiler uygulayarak mimarlar ve mühendisler, inşa edilmiş çevrenin sürdürülebilirliğini önemli ölçüde artırabilir. Eghbali ve Didari'nin vurguladığı gibi, çeşitli paydaşların işbirliği çabaları, bu enerji verimli tasarımların hayata geçirilmesinde ve sürdürülebilirliğin mimari uygulamalarda ön planda kalmasını sağlamada önemli bir rol oynamaktadır (Eghbali ve Didari, 2018).

2.4.1. Üretken tasarım çalışma prensibi

Yapı optimizasyonu prosedürleri tipik olarak yinelemeli bir şekilde tekrarlanabilen altı farklı adımdan oluşur (Østergård, Jensen ve Maagaard, 2016). Bunlar;

- Tasarım değişkenlerinin ve kısıtlamalarının belirlenmesi.
- Simülasyon aracının seçilmesi ve bir temel modelin oluşturulması.
- Amaç işlevlerin seçimi.
- Optimizasyon algoritmasının seçimi.
- Optimizasyon yakınsaması elde edilene kadar simülasyon çalıştırma.
- Verilerin yorumlanması ve sunulmasıdır

<u>Tasarım değişkenlerinin ve kısıtlamalarının belirlenmesi</u>

Bir tasarım optimizasyon problemini çözmeden önce, tasarım problemi matematiksel olarak formüle edilmeli; burada amaç ve kısıt fonksiyonlarının yanı sıra tasarım değişkenleri de tanımlanmalıdır (Chang, 2015).

Amaç işlevlerin seçimi

Dynamo programında oluşturulan komut dosyasının Üretken Tasarım aracında kullanılabilmesi için belirli düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Üretken Tasarım, optimize edilmiş çıktıların bir dizi tanımlanmış talimat ve ilişki temelinde oluşturulmasını ifade eden geniş bir terimdir. Revit uygulamasındaki Üretken Tasarım Aracı, kullanıcı tarafından belirtilen girdilere, kısıtlamalara ve hedeflere dayalı olarak bir dizi tasarım çıktısı üretme yeteneğine sahiptir. Bu araç, belirlenen hedeflere ulaşmak amacıyla girdi değerlerinin farklı yinelemelerini çalıştırmak üzere Dynamo'yu kullanmaktadır. Dynamo içerisinde, Üretken Tasarım sürecinde kullanılan parametreleri karakterize etmek ve oluşturulan tasarım çıktılarını değiştirmek amacıyla belirli düğümler bulunmaktadır (EvolveLAB, 2022). Bu düğümler, girdi, kısıtlayıcı ve çıktı olarak adlandırılmaktadır.

Optimizasyon algoritmasının seçimi

Problemin çözümünde tek bir amaç çıktısı olduğu için çalışma, tek amaçlı bir optimizasyon problemidir. Bu optimizasyonun üretken tasarım ile çözümlenmesi için Dynamo'da tamamlanan komut dosyasının Üretken Tasarım Aracı'na aktarılması sürecinde yapılması gereken ayarlar şu şekildedir:

- Girdi, kısıtlayıcı ve hedef çıktının tanımlanmış olması,
- Girdi düğümleri için Data.Remember düğümünün eklenmiş olması (Bu düğüm sayesinde, Üretken Tasarım Aracı'nın alternatifleri üretirken Dynamo'dan verileri yinelemeli olarak okumaması aracın daha hızlı çalışmasını sağlamaktadır.)
- Revit'te üretilen bir modelin Üretken Tasarım işlevine sokulmamış olması. Üretken Tasarım Aracı, Revit modelleri ile değil, Dynamo geometrileri üzerinden çalışmaktadır. Bu nedenle, Üretken Tasarım sonrası seçilen modelin Revit elementine çevrilmesi isteniyorsa bu düğümlere öncesinde Data.Gate düğümünün ilişkilendirilmesi ve kapalı olarak tutulması gerekmektedir
- Komut dosyası son kez Dynamo içerisinde çalıştırılmalı ve dosya kaydedilmelidir.

Üretken Tasarım Aracına, doğrudan Dynamo içerisinden erişim sağlanabileceği gibi (öncelikle Üretken Tasarım paketinin indirilmiş olması gerekmektedir), aynı zamanda Revit programı üzerinden de erişim mümkündür.

2.4.2. Üretken tasarım sistemleri

Üretken tasarım sistemleri, temelde algoritmalar ve matematiksel kuralları kullanarak tasarım formlarının dönüşümünü kodlamaktadır. Bu sistemler, tasarım sürecini belirgin bir şekilde basitleştirerek farklı seçenekler sunmakta ve çeşitli alternatiflerin keşfedilmesine ve değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Gürsel Dino, 2012).

Soddu (2006), üretken tasarım sistemlerinin çeşitli olguları taklit etmek amacıyla farklı rafine edilmemiş tasarım varyasyonları ile kurallar ve sınırlamalar oluşturduğunu vurgulamaktadır. Gerçek hesaplama ve dijital teknolojilerin kullanımı, tasarımcıların yeni ve etkili tasarım süreçleri geliştirme yeteneklerini artırmalarına yardımcı olmaktadır (Shea, Aish ve Gourtovaia, 2005). Üretken tasarım sistemleri, keşfedilmemiş formlar ve eserler üretme olanakları sağlayan mekanizmalar ve süreçler olarak tanımlanmaktadır.

Üretken tasarım süreçleri temel olarak dört adımı takip eder ve tekrarlar: Temsil, Üretim, Değerlendirme ve Geri Bildirim. Bu işlemler girdi-çıktı ilişkisine dayanmaktadır. Cagan (2005), temsil aşamasının tasarım probleminin tanımlanması olduğunu ve uygun tekniklerin üretilmesine yardımcı olduğunu açıklamıştır. Üretim ise mekanizmanın tümünün ve parçalarının performansını içerir. Değerlendirme, sistemin test aşamasını temsil etmekte olup, hedefleri ile sınırları arasındaki ilişkilendirmenin ne denli başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Ayrıca geri bildirim, tasarım iyileştirmelerinin bir sonraki aşamasına sağlandığı son adımdır (Cagan, Campbell, Finger ve Tomiyama, 2005).

Günümüz üretken tasarım sistemleri, mimari teorileri ve pratiklerini sorgulayarak yeni dijital teknoloji ve hesaplamalı tasarım uygulamalarına odaklanmıştır. Oxman (2006), üretken tasarımın hızlı evriminin tasarım sistemleri ve yaklaşımları ararken çeşitli yollar izlediğini belirtmiştir. Hesaplamalı tasarım araştırmasının geleceği, üretim süreçlerinde kullanılan uygulamaları ve teknikleri yeniden düşünme gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Fischer, "Generative Design Öğretimi" (2002) adlı makalesinde, sistemlerin daha iyi anlaşılması için ortaya çıkan alanları sunarak, üretken bilgisayar destekli tasarım yöntemlerine temel bir sınıflandırma sağlamıştır. Ancak belirtilen her alan özellikle işlevsel değildir; çoğu diğerleriyle özellikleri paylaşmaktadır. Bu, mimari tasarım alanı için yeni bir bütünsel sınıflandırmanın önemli olmasını sağlamaktadır. Boumaraf (2022) tarafından yazılan doktora tezinde, üretken tasarım yöntemlerini dokuz sisteme ayırmaktadır: Algoritmik

Sistemler[1], Biçim Grameri[2], L-Sistemleri (Lindenmayer Sistemi)[3], Hücresel Otomata Sistemi[4], Genetik Algoritma Sistemi[5], Voronoi Sistemi[6], Alt Bölme Sistemi[7], Topoloji Optimizasyon Sistemi[8] ve Sürü Davranış Sistemi[9].

2.4.3. Üretken tasarım ve BIM entegrasyonu

Üretken tasarım, bilgisayar yazılımları aracılığıyla belirli tasarım hedeflerine ulaşmak amacıyla çok sayıda alternatif çözümün otomatik olarak üretilmesi sürecidir. Bu süreçte, tasarımcılar belirli parametreleri (örneğin, malzeme türleri, yapı yüksekliği, maliyet sınırlamaları vb.) tanımlamakta ve yazılım, bu parametrelere uygun çeşitli tasarım seçenekleri üretmektedir. Üretken tasarım sayesinde, aynı anda birçok alternatif tasarım çözümü üretilebilmekte; performans kriterlerine (enerji verimliliği, maliyet etkinliği, yapısal dayanıklılık vb.) dayalı olarak optimize edilmiş çözümler sunulmakta ve geleneksel tasarım yöntemlerine kıyasla daha yenilikçi ve sıradışı tasarım seçenekleri sağlanabilmektedir.

Üretken tasarım ile Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) entegrasyonu, her iki teknolojinin avantajlarını bir araya getirerek daha akıllı ve verimli tasarım süreçleri oluşturulmasına olanak tanır. Bu sayede, üretken tasarım sürecinde üretilen alternatif tasarım çözümleri doğrudan BIM modellerine entegre edilerek görselleştirilebilir ve analiz edilebilir.

Üretken tasarım, performans kriterlerine göre optimize edilmiş çözümler sunarken, bu çözümler BIM modeli kullanılarak detaylandırılmaktadır. BIM, tüm proje paydaşlarının aynı model üzerinden çalışmasını sağlarken, üretken tasarım süreci farklı paydaşlardan gelen girdilere dayalı olarak daha uyumlu ve optimize edilmiş tasarım çözümleri sunmaktadır.

Üretken tasarım ve BIM entegrasyonu, inşaat ve mimarlık sektörlerinde daha yenilikçi verimli ve sürdürülebilir projelerin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu

[1] Algorithmic Systems
[2] Shape Grammars
[3] L-Systems (Lindenmayer System)
[4] Cellular Automata System
[5] Genetic Algorithms System
[6] Voronoi System
[7] Subdivision System
[8] Topology Optimization System
[9] Swarm Behavior System

entegrasyon, erken tasarım aşamalarından itibaren daha iyi kararlar alınmasını sağlayarak projelerin başarıyla tamamlanmasına katkıda bulunmaktadır.

2.5. Üretken Tasarım Yöntemleri

Üretken tasarım sistemleri, esasen algoritmalar ve matematiksel kuralları kullanarak tasarım formlarının dönüşümünü kodlama işlevi görmektedir. Bu sistemler, tasarım sürecini belirgin bir şekilde basitleştirirken, farklı seçenekler sunarak çeşitli alternatifleri keşfetme ve değerlendirme imkânı tanıyan yöntemler olarak nitelendirilebilir (Gürsel Dino, 2012). Soddu (2006), üretken tasarım sistemlerinin farklı olguları taklit etmek için çeşitli rafine edilmemiş tasarım varyasyonlarıyla kurallar ve sınırlamalar oluşturduğunu vurgulamaktadır. Gerçek hesaplama ve dijital teknolojilerin kullanımı, tasarımcıların yeni ve etkili tasarım süreçleri oluşturma becerilerini geliştirmelerine yardımcı olmaktadır (Shea, 2005). Üretken tasarım sistemleri, keşfedilmemiş formlar ve eserler üretme olanakları sağlayan mekanizmalar ve süreçler olarak tanımlanmaktadır.

Günümüz üretken tasarım sistemleri, mimarlık kuramlarını ve pratiklerini yeniden ele alarak dijital teknolojiler ve hesaplamalı tasarım yaklaşımlarına odaklanmaktadır. Oxman (2006), üretken tasarımın hızlı evrimi sürecinde, tasarım sistemleri ve yaklaşımlarına yönelik çok yönlü araştırma yollarının benimsendiğini ifade etmektedir. Bu bağlamda, hesaplamalı tasarım araştırmalarının geleceği, üretim süreçlerinde kullanılan yöntem ve tekniklerin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Fischer (2002), üretken bilgisayar destekli tasarım yöntemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla ortaya çıkan araştırma alanlarını sınıflandırarak temel bir çerçeve sunmuştur. Ancak söz konusu sınıflandırma, her bir alanın işlevselliği açısından mutlak bir ayrım sunmamakta; birçok alan, birbirleriyle örtüşen özellikler taşımaktadır. Bu durum, mimari tasarım disiplini için daha bütüncül ve kapsamlı bir sınıflandırma sisteminin gerekliliğini gündeme getirmektedir. Nitekim Boumaraf'ın (2022) doktora tezinde önerdiği sınıflandırma, üretken tasarım yöntemlerini dokuz temel sistem başlığı altında toplamaktadır: algoritmik sistemler, biçim grameri, L-sistemleri (Lindenmayer sistemleri), hücresel otomata sistemleri, genetik algoritmalar, Voronoi sistemleri, alt bölme sistemleri, topoloji optimizasyonu ve sürü davranışı sistemleri.

Algoritmik sistemler

Tüm üretken uygulamalar arasında algoritmik sistemler, en esnek ve geleneksel olanlar olabilir. Belirli organizasyon veya ilişki koşullarını takip etmezler. Tasarımcının tasarım amaçlarını ve yöntemlerini uygulama kolaylığına sahip olduğu bir nesil ortamını genişletirler (El-Khaldi, 2007). Algoritma kelimesi, belirli bir problemin çözümü için aynı fikrin parametrelerini içermeyi amaçlayan, yöntem, süreç ve teknik olarak adlandırılan birçok farklı literatür çalışmasında yer alabilir. Yürütme becerisi gerektiren bir sorunu çözmek ve sona erdirmek için tasarlanmış, adım adım belirli bir dilde sunulan bir dizi komuttur (El-Khaldi, 2007).

Biçim gramerleri

"Shape Grammars" terimi Türkçede genellikle "Biçim Gramerleri" veya "Form Gramerleri" olarak ifade edilmektedir. Bu terim, tasarımın yapısal ve geometrik öğelerini açıklamak için kullanılan bir kavramdır. Biçim gramerleri, tasarımın dilini ve yapılarının nasıl oluşturulduğunu tanımlamak için kurallar ve yapılar içeren bir yaklaşımı ifade eder. Bu kavram, mimarlık, tasarım ve bilgisayar bilimleri gibi alanlarda kullanılır ve tasarım süreçlerini formel bir yapı içinde açıklamak için kullanılmaktadır.

Biçim grameri, bir tasarım sürecini temsil etmek için adım adım problem çözme prosedüründe uygulanan bir dizi şekil kuralıdır. Biçim gramerleri, metinsel veya sembolik algoritmalardan ziyade uzamsaldır (Knight, 1999). Özellikle form temelinde farklılaşan, ancak işlev tarafından yönlendirilen formların tasarımında oldukça kullanışlıdırlar (Shea ve Cagan, 1999). Bu üretken sistemler, 1972 yılında Stiny ve Gips tarafından icat edilmiş ve "tasarım odaklı" üretken sistemler olarak adlandırılmıştır. Araştırmanın temellerini, tasarım analizi ve tasarım sentezi bağlamında algoritmik tasarım sistemlerine kadar genişletirler (Alfaris, 2009).

L sistemleri

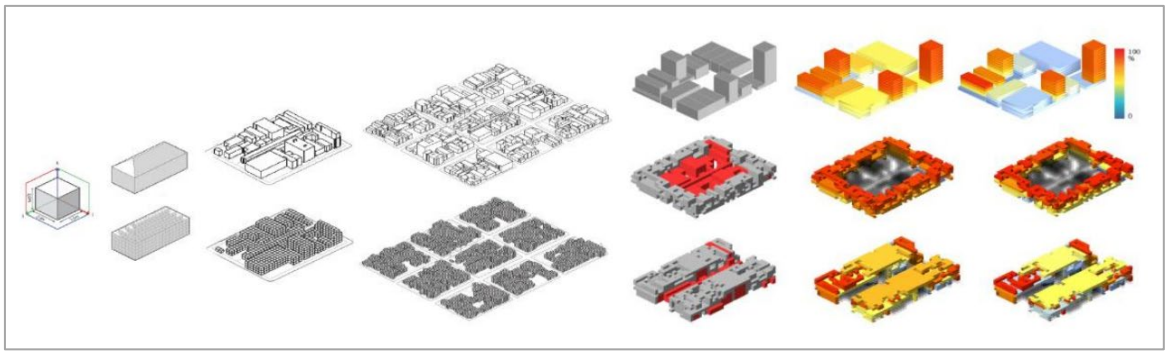
Rocker (2006), mimarların antik çağlardan beri doğada var olan geometrik formlardan ilham aldıklarını ifade etmiştir. Birçoğu tasarımlarında doğal geometrik şekiller kullanmaya çalışmaktadır; Lindenmayer sistemi de bunlardan biridir (Lindenmayer, 1968). 1968'de

biyolog Aristid Lindenmayer, kısaca L-sistemleri olarak bilinen, doğadan ilham alan sistemin yeniden yazılması temel kavramına dayanan bitki büyümesine ilişkin matematiksel bir teori önerdi. Özellikle son derece küçük girdilerle son derece karmaşık tasarımlar üretme yeteneklerinden dolayı (Boumaraf, 2022) tasarımcılar için güçlü bir araç olarak kabul edilir. Kolarevic (2003), "Dijital Çağda Mimarlık" adlı kitabında L-sistemlerinin, tasarımcıların karmaşık yapılar oluşturabileceği ve daha önce yaratılmış nesnelerin yerini alabileceği kurallara ve sistemlere dayandığını yazmaktadır. Bu sistemler, şekil benzerliğine sahip formlar oluşturmak için uygulanan matematiksel algoritmalardır (Kolarevic, 2003). Literatürde bulunan araştırmalara göre bu yöntem daha çok kentsel planlama için kullanılmaktadır.

Hücresel otomat

Hücresel Otomatlar, üretken sistemler arasında yer almakta olup, birçok araştırmacı onları kendini yeniden üreten sistemlerin modelleri olarak kabul etmektedir. Hücresel otomat, her biri renk veya sayı gibi belirli bir sayıda duruma sahip olan hücrelerin, dikey ızgaralar halinde düzenlendiği bir kombinasyondur. Her hücrenin oluşumu öncelikle kendi gerçek durumundan ve bitişik hücrelerin durumundan oluşur (Alfaris, 2009). Hücresel Otomatlar, büyük olasılıkla biyolojik çağrışımlardan etkilenen evrimsel üretken sistemlerdir (Grobman, Yezioro ve Capeluto, 2009). Hücresel otomat, çok çeşitli karmaşık diyagramlar oluşturmak için basit matematiksel ve analitik yöntemlere dayanmaktadır.

Hücresel Otomatlar ayrıca çeşitli yollarla mimari ve kentsel planlamaya etkili bir şekilde entegre edilmiştir (Herr ve diğerleri, 2005). Ancak aşağıdan yukarıya doğru olduğu için sonuçların tahmin edilmesi çoğu zaman zorlayıcıdır (Dinçer, 2014). Tasarım profesyonelleri, üretken süreci yönlendirmek için gereken kısıtlamaları belirleme sürecinden genellikle habersizdirler. Bu yaklaşımdaki pratik motivasyon, son deneysel araştırmalarda zaten azalmıştır. Aynı üretken sistem özelliklerine dayalı olarak mimarinin ve kentsel tasarımın farklı yönleri için birçok karşılaştırılabilir uygulama kullanılmaktadır (Zandavali, 2019). Uygulamaların, çevre modeli bağlantısı ve bina duyarlılığı olarak performansa dayalı kentsel ölçümler oluşturmak için çeşitli dijital araçlarla birleştirilmiş üretken bir sistem olarak hücresel otomatların entegrasyonu yoluyla geniş bir nesil yelpazesi yaratması beklenmektedir.



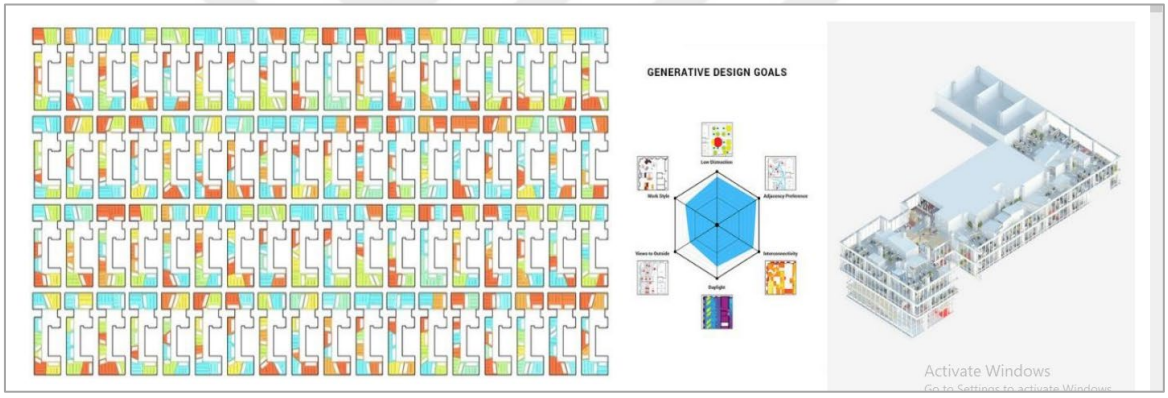
Şekil 2.5. Bina, hücresel otomat üretim sistemini kullanarak yeniden tasarlanan avlu ve sokak morfo-tipolojilerini oluşturur ve sonuçlandırır (Zandavali, 2019)

Genetik algoritma

Genetik Algoritma (GA), 1970'li yıllarda Holland tarafından sunulan, doğal evrimden ilham alan bir hesaplama yöntemidir (Kalay, 2004). Aynı zamanda tasarım problemlerini çözmek için bir arama yöntemi olarak da kabul edilmektedir (Caldas, 2008). Ayrıca GA bir çözüme yakınsamanın yinelemeli süreci sırasında değişim ve çaprazlama tarafından yönlendirilen, biyolojik olarak esinlenilmiş bir tekniktir. Bu teknik, evrimsel algoritmalar olarak adlandırılan daha geniş bir optimizasyon stratejileri sınıfının bir parçasıdır (Yang, 2021). Yapısal veya performans uygulamaları da dahil olmak üzere tam olarak tanımlanmış sorunların çözülmesine yardımcı olur. Üretken algoritma sistemi, mimari formun üretken gücü olarak doğa modelini önermektedir (Boumaraf, 2022).

Khaled Rasheed tarafından geliştirilen ve mühendislik tasarım alanlarının yapısına ve özelliklerine göre uyarlanmış yeni GA operatörlerini ve stratejilerini kullanan bir genetik algoritma, sürekli tasarım alanı optimizasyonu için tasarım optimizasyonunda kullanılabilir (Rasheed, 1998). Genetik algoritma sistemleri, tanımlanmış bir popülasyonun oluşturulması, seçilmesi, çaprazlanması ve mutasyonları dahil olmak üzere dört ana aşamadan oluşur. Tüm üretken tasarım sistemlerinde temsil, tasarım problemi ile üretim süreci arasında yer alır. Genetik algoritmalarda temsil, genomun sembolik özelliklerine göre oluşturulan bir aşamadır (Mitchell, 2009). Gösterimlerin matematiksel olduğu ve semboller aracılığıyla yapıldığı bilinirken, genetik algoritma sistemlerinde temsillerin görsel olmadığı anlaşılmaktadır. Temsilden sonraki aşama, sistemin bireyleri, başlangıçta sunulan tasarım problemine en uygun çözümü arayan bir üretim mekanizmasına dahil ettiği üretken sürecin kendisidir. Sürecin ilk adımı, bireylerin rastgele bir neslini belirlemektir.

Mimari tasarımda genetik algoritma sistemi çeşitli amaçlar için uygulanmıştır; optimizasyonu (Caldas ve Norford, 2001; Salge, Lipski, Mahlmann ve Mathiak, 2008), mekan yerleşim planı (Coates ve Hazarika, 1999; Gero ve Kazakov, 1998), temsil kalıplarının evrimi (Ding ve Gero, 2001) ve mimari form bulma. Caldas ve Norford (2001) çalışmasında, cephe tasarımları gibi farklı çözümleri optimize etmek, enerji tüketimini incelemek ve algoritma sistemini kullanmışlardır. Villaggi ve Nagy (2017), mimarlık için bir üretken tasarım sistemi olarak genetik algoritmanın kullanılmasının, öngörülemeyen yenilikçi düzenlerin keşfedilmesine, yüksek performanslı tasarım özelliklerine, illüstrasyon kısıtlamaları ve mekansal desenler yerine hedefler arasındaki alışverişin yönetilmesine olanak sağladığına inanmaktadır (Villaggi ve Nagy, 2019). Bu, mekansal gereksinimleri ve bağlamsal koşulları hesaba katarken mimari tasarımı düşünmenin, üretmenin ve kontrol etmenin yeni yönlerini kapsamaktadır.



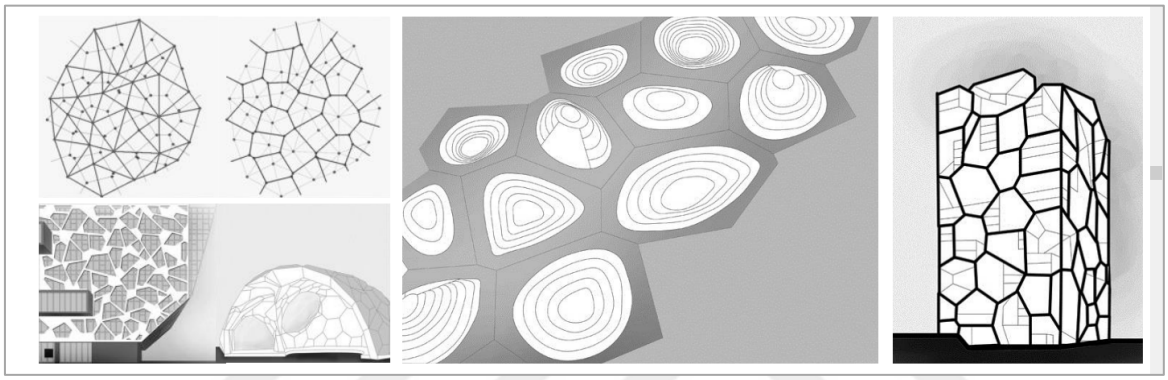
Şekil 2.6. Autodesk Araştırma Grubu'nun "The Living" projesinin üretken tasarım seçenekleri ve üretken tasarım hedefleri (Villaggi ve Nagy, 2019)

Voronoi sistemi

Voronoi Diyagramı, matematiksel modülasyon kullanarak doğadaki biyolojik yapıları ve öz-düzenleme kısıtlamalarını gözeten bir üretken tasarım sistemidir (Nowak, 2015). anımlanmış şekillerde temsil edilen üretim noktalarını veya bölgelerini içeren bir dizi formdan oluşmaktadır. Farklı uzunluklarda çizgilere sahip elemanlardan oluşan hücreler, düğümler ve açılardan meydana gelir. Hücrelerin her biri, hemen hemen aynı konum yakınlığına sahip bir dizi noktayı kapsar.

Voronoi sistemi, bir alanı belirli noktalar arasında bölen en yakın komşu bölgeleri oluşturan matematiksel bir kavramdır. Bu bölgeler, bu noktalardan herhangi birine olan en yakın

noktaları içeren alanlardır ve genellikle bu bölgelerin sınırları geometrik şekillerle belirtilir. Bu sistem, coğrafya, bilgisayar bilimi, matematik ve tasarım gibi çeşitli alanlarda kullanılır ve genellikle bir alanın bölünmesi veri analizi ve yapısal planlama gibi amaçlarla uygulanır. Bağımsız olarak ortaya çıkan ve daha sonra faydalı olduğu kanıtlanan bu kavram, son zamanlarda birçok bilim dalı tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin, biyoloji ve fizyolojide bu sistem, orta eksen dönüşümünü incelemek için kullanılmış; bunun yanı sıra, kimyada Wigner-Seitz bölgelerini test etmek ve daha sonra meteoroloji ile coğrafyada Thiessen poligonlarını keşfetmek için de uygulanmıştır (Nowak, 2015).



Şekil 2.7. Kentsel mekanlarda, dış yapıda ve cephe tasarımında Voronoi diyagramlarının uygulama örnekleri (Nowak, 2015)

Alt bölme sistemi

Alt bölme sistemi, genellikle karmaşık bir yapıyı yönetilebilir parçalara bölmek veya daha detaylı bir düzen oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Özellikle grafiklerde, coğrafi bilgi sistemlerinde ve bilgisayar grafiklerinde alt bölme sistemleri sıkça kullanılmaktadır. Bu sistemler, büyük bir bütünü daha küçük, daha ölçeklenebilir ve daha yönetilebilir parçalara ayırmak amacıyla kullanılabilir. Kristallerin büyüme mekanizmasından etkilenen bir hesaplamalı tasarım süreci yoluyla, birçok anlamda yönlendirilmiş sayısız çizgiden oluşur ve daha karmaşık sonuçlar sağlamak için daha basit algoritmik prosedürler kullanır (Boumaraf, 2022).

Günümüze mimaride veya kentsel tasarımda aynı üretken sistemi içeren bir örnek bulunmamaktadır; ancak bu sistemin kentsel planlama ve mekânsal organizasyonda öncü tasarımlara yol açacağına inanılmaktadır. Temel bir dikey büyüme formülü, karmaşık kentsel yapıların yaratılmasına olanak tanır. Programlamanın temellerini anlamak, noktalar

üretmek için basit bir işlevi başlatmanın veya ‘döngüye almanın’, doğada gözlemlenen karmaşık ve çekici modelleri taklit etmemizi nasıl sağlayabileceğini gösterir.

Topoloji optimizasyon

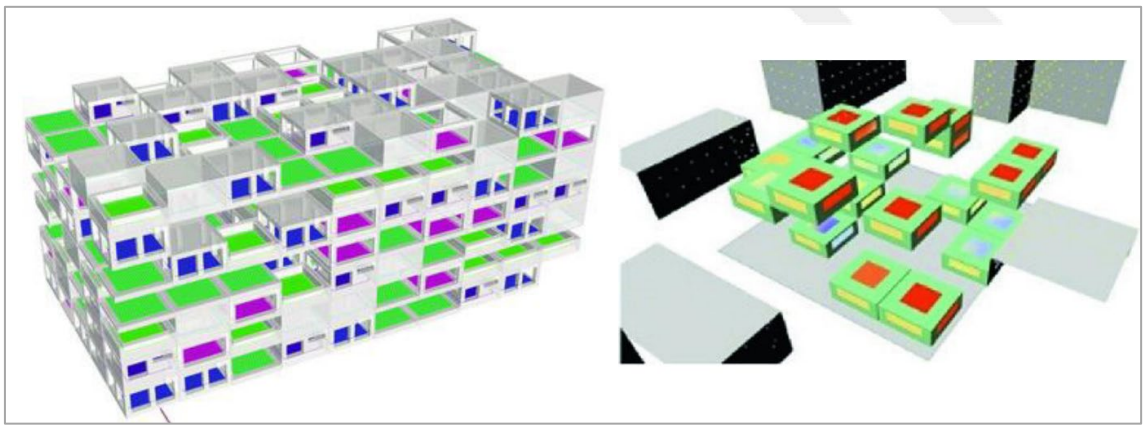
Topoloji optimizasyon algoritması, ilk olarak otomotiv ve havacılık gibi tasarımda parçaların verimliliği ve öneminin belirleyici olduğu endüstriyel sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır (J. K. Guest ve Moen, 2010). Farklı alanlardaki üretken tasarım uygulamalarında kullanılan sistemlerden biri olan “Yapısal Optimizasyon” olarak da bilinmektedir. Topoloji optimizasyonu, önceden tanımlanmış bir dizi performans amacına yanıt veren sonuçlar elde etmek için belirli bir tasarım alanındaki düzeni bir dizi sınırlama ve yük için optimize eden matematiksel bir teknik olarak tanımlanır (Dapogny, 2017). Optimizasyon yaklaşımlarının analizi ve varyansı için sistem, Hareket Eden Asimptotlar Yöntemi, Genetik Algoritmalar, Optimalite Kriterleri yöntemi, Seviye Setleri veya Topolojik Türevler gibi çeşitli yöntemlerin uygulanmasıyla ilerleyebilir. Uygun sonuçların elde edilmesi için gereken karmaşıklık ve uzun süre, bu sistemin mimari söylem ve çalışmalarda tartışılmasını oldukça sınırlamaktadır (J. K. Guest ve Moen, 2010). Bununla birlikte mimari tasarım uygulamalarından bahsedilebilecek bazı örnekler de mevcuttur. Mimarlıkta şekil ve topoloji optimizasyonunun belki de en bilinen örneği Fransız mimar Gustave Eiffel’in Eyfel Kulesi’dir. Bu örnek daha çok doğa desenlerinden ilham alan tipolojisi üzerine, yerçekimine ve rüzgara tepki verecek en uygun şekil ve yüklerin optimizasyonuna odaklanmıştır (Boumaraf, 2022).

Sürü davranış sistemi

Sürü davranış sistemi, formların ve karmaşık şekillerin evrimsel süreçlere göre simülasyonuna, dikkate alınmasına ve üretilmesine olanak sağlayan üretken tasarım sistemlerinden biridir (Kolarevic, 2000). “Swarm” terimi ilk olarak böceklerin yeniden gruplanma mekanizmaları için kullanılmış, daha sonra herhangi bir hayvan grubuna yayılarak organize bir davranış sergileyen bir kavram haline gelmiştir. Bu sistemler, genellikle bireysel unsurların basit kurallara dayanarak hareket ettiği ve grup olarak karmaşık davranışlar sergilediği modeller olarak tanımlanır. Sürü davranışı sistemleri, doğadaki sürülerin hareket ve etkileşim biçimlerini anlamak amacıyla yapay zeka, robotik veya optimizasyon gibi alanlarda uygulamalar için ilham kaynağı olabilmektedir. Mimari

tasarımda, acil durum binaları, görünürlük planlaması ve kentsel planlama stratejileri için sürü davranış sistemi ile birçok ara bağlantı modeli tasarlanabilir ve simüle edilebilir (J. Guest, Eaglin, Subramanian ve Ribarsky, 2013). Sürü zekası, matematik ve teknoloji alanlarında dikkate değer bir öneme sahip olmasına rağmen, özellikle mekân planlaması ve tasarım performansı gibi profesyonel uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmamaktadır. Şu ana kadar, sürü davranış sistemleri mimari uygulamalarda dayanıklılık, malzeme verimliliği ve fonksiyon düzenleme çözümleri için yüksek bir potansiyel sunmaktadır (Tan, Shi ve Tang, 2018).

Mimarlık uygulamalarında sürü davranış sistemlerinin önemli bir örneği, "Evolutionary Cellular Design Engine" çalışmasıdır. Bu çalışma, ajan tabanlı modüllerin mimari tasarımına potansiyel uygulamaları keşfetmektedir. Amaç kendiliğinden örgütlenen yapıların evrilen niteliklerini kullanarak tasarım çözümleri aramaktır. Bu nedenle, Wiesenhuetter ve diğerleri (2016), mimari tasarım yaklaşımları için geliştirilen evrimsel bir süreçte deneysel bir kurulum oluştururlar. Sistem, sadece mimari tasarım yaklaşımlarına evrimsel süreçlerden bir yorum sağlamak için CAD yazılımı için bir eklenti içinde oluşturulan bir bilgisayar modelidir. Mimarlar, mimari kavramlarını gerçekleştirmek için yenilikçi stratejiler geliştirebilirler. Sürü zekası, mimari form bulma, kentsel tasarım, planlama ve mekansal düzenleme alanlarında kullanılabilir (Magdy ve Eldaly, 2020).



Şekil 2.8. Evolutionary optimized cellular housing tasarımı için simülasyon motoru (sol), vokselin kentsel çevredeki temsili (sağ) (Magdy ve Eldaly, 2020)

Duyarlılık analizi yapıldıktan sonra en kritik parametreler, tercih sırasına göre duvar/pencere oranı (WWR), cam tipi, yönelimi, bina tipi ve formu ile duvar yalıtımı olarak belirlenmiştir. Simülasyonların daha sonraki aşamalarda gerçekleştirilmesi durumunda, proje tasarımın

erken aşamasında bu öncelikli parametreler hakkında bilinçli karar alma fırsatını kaybeder. Bu nedenle, erken aşamadaki tasarım simülasyonu, daha sonraki aşamalardaki enerji simülasyonlarının yerine geçmemesi için güçlendirilmeye yöneliktir (Samuelson vd., 2016).

2.6. Biçim Gramerleri

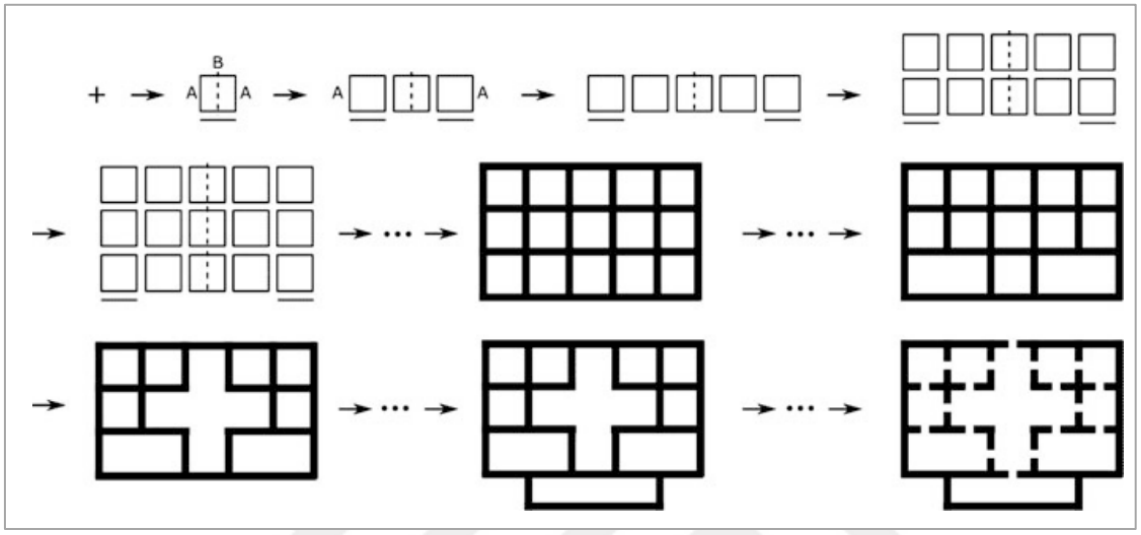
Üretken tasarım algoritmaları, hesaplamalı tasarım araştırmalarının önemli bir parçası olarak, tasarım sürecinin belirli kısımlarını formüle etmek veya otomatikleştirmek için kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, insan tasarımcıların tasarım alanını daha resmi ve etkili bir şekilde keşfetmelerine yardımcı olmak amacıyla geliştirilmiştir (Singh ve Gu, 2012). Geleneksel tasarım felsefesi ve metodolojisine katkıda bulunarak, tasarımcıların tasarımı sistematik bir şekilde manipüle etmelerine, etkileşimde bulunmalarına ve tasarımla daha derin bir şekilde etkileşim kurmalarına olanak tanır (Gu ve Amini Behbahani, 2021).

Biçim dilbilgileri, yaklaşık kırk yıldır üretken tasarımın başlıca hesaplamalı yaklaşımlarından biri olarak kabul edilmektedir. Noam Chomsky'nin 1960'lar ve 1970'lerdeki yapısalcı fikirleri döneminde ortaya çıkan bu yöntemler, o zamandan beri stilistik analiz, tasarım üretimi ve özelleştirme gibi çeşitli tasarım uygulamaları için geliştirilmiştir. Ayrıca daha optimal sonuçlar elde etmek amacıyla diğer üretken algoritmalarla birlikte de kullanılmaktadır. Biçim dilbilgileri ve uzantıları, mimarlık – ilk örneklerin gösterildiği alan – başta olmak üzere, endüstriyel tasarım, resim ve tekstil tasarımı gibi görsel sanatlar, hatta müzik, animasyon ve bilgisayar dilleri gibi çeşitli yaratıcı alanlarda uygulanmaktadır.

Stiny ve Gips (1972) tasarımda evrensel grameri (Universal Grammar[1]) temel konseptini uygulayarak biçim dilbilgilerini geliştiren ilk kişiler olmuştur. Kurallar ile dönüşüm sağlayan bir üretken sistem gösterilmiş ve bu sistem, kuralların uygulanmasıyla geometrik şekiller oluşturabilmiştir. Bu tür tasarım dilbilgilerinin öncülü, dilde olduğu gibi sınırlı bir bileşen setinden birçok tasarım örneği oluşturabilecek soyut dönüşüm kurallarının varlığıdır. Her kural seti, belirli bir tarzı veya benzer tasarımların dilini resmi olarak temsil ederek ve çoğaltarak yakalayabilir. Stiny, Stiny ve Gips'in (1972) çalışmalarına göre, biçim dilbilgileri

[1] Universal Grammar: Chomsky (1965), insanların temel dilbilgisel özellikleri içeren ve bebeklerin dillerinin dilbilgisel yapısını hızla öğrenmelerini sağlayan doğuştan bir mekanizmaya (Dil Edinim Cihazı veya LAD olarak adlandırılan) sahip olduğunu öne sürmüştür. Bu yerleşik özelliklere Universal Grammar (UG) adını vermiştir.

ilk kez tuval üzerine akrilik desenler oluşturmak için gösterilmiştir. Bu yöntem, Çin geleneksel pencereleri için kafes desenleri (Stiny, 1977) ve Palladian villalarının zemin planlarını oluşturmak için daha karmaşık biçim dilbilgileri izlemiştir (Stiny ve Mitchell 1978) (Şekil 2.9).



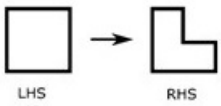
Şekil 2.9. La Malcontenta'nın zemin kat planını oluşturmak için Palladyan dilbilgisi uygulamasının seçilmiş süreçleri (Gu ve Amini Behbahani, 2021)

Biçim dilbilgisi, doğası gereği üretkendir ve belirli bir tarzda hızlı bir şekilde tasarımlar üretmek için resmi ve yinelemeli bir çerçeve sağlar (Chakrabarti ve diğerleri, 2011). Bu amaçla, dilbilgiler tasarım bilgisini kurallar olarak hesaplamalı bir yapıya kodlamaktadır. Tasarım bilgisinin dilbilgisine gömülebilmesi, kullanıcıların bir tasarım oluşturmak için belirli bir disipliner uzmanlığa sahip olmalarını gerektirmez. Dilbilgisinin uygulanması, her bir şekli bir dizi geometrik işlemle başka bir şekle dönüştüren dönüşüm kurallarıyla desteklenmektedir. Bu bölüm, biçim dilbilgisinin temel bileşenlerini ve uygulamalarını kısaca incelemektedir.

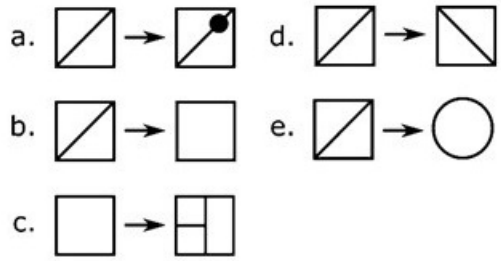
Biçim dilbilgisinin ana bileşenleri

Bir biçim dilbilgisinin ana bileşenleri, şekillerin uzamsal dönüşümlerini belirten biçim kurallarıdır. Bir biçim, sonlu sayıda köşenin en uzun çizgilerle birbirine bağlandığı geometrik varlıkların herhangi bir seti için genel bir terimdir (Stiny, 1980). Bir biçim kuralı, kural uygulamadan önceki ve sonraki durumları temsil eden sol taraf (LHS) ve sağ taraf (RHS) biçimlerinin bir çiftidir; burada RHS biçimi, LHS biçiminin uzamsal dönüşümlerinin

sonucudur. Yaygın bir biçim kuralını göstermek için, biçim çiftleri genellikle bir ok sembolüyle ayrılarak soldan sağa doğru sıralanır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. LHS ve RHS şekillerini içeren ortak bir şekil kuralı



Şekil 2.11. Farklı dönüşüm türlerine dayalı şekil kuralı örnekleri: (a) toplama, (b) çıkarma, (c) bölme, (d) değiştirme ve (e) yerine geçme

Bir biçim dilbilgisi, sonlu sayıda biçim, sonlu sayıda sembol ve biçimleri dönüştürmek için uygulanabilecek sonlu sayıda kural içermektedir. Biçim dilbilgisinin temel bileşenlerin biri, dilbilgisinin uygulama başlangıç noktasını belirten başlangıç biçimidir (Stiny, 1980). Başlangıç biçimi, herhangi bir biçim (boşluk dahil) olabilir; ancak biçimin bir kısmı veya tamamı, dilbilgisinin başlatılabilmesi için en az bir biçim kuralının sol taraf (LHS) biçimiyle eşleşmelidir. Başlatıldıktan sonra, dilbilgisi her bir önceki adımda oluşturulan LHS biçimlerini sağ taraf (RHS) biçimlerine dönüştürerek kuralları yinelemeli olarak uygular. Genel olarak, dilbilgisi uygulamasının devam edebilmesi için, oluşturulan biçimlerin bir kısmı veya tamamı biçim kurallarının LHS biçimiyle eşleşmeye devam etmelidir; aksi takdirde uygulama sonlandırılır. Stiny (1980), bir biçim dilbilgisinde biçimleri ve kuralları belirtirken etiketlerin kullanılmasının önemini vurgulamaktadır.

Kurallar, şekilleri çeşitli şekillerde dönüştürebilir. Literatürde genellikle beş yaygın dönüşüm türünden (aynı zamanda değiştirme formatı olarak da adlandırılır) bahsedilir: ekleme, çıkarma, bölme veya ayırma, değiştirme ve yer değiştirme (Knight, 1999; Trescak, 2009; Wonka, 2003). Ekleme kuralları, LHS (sol taraf) biçimini korurken RHS (sağ taraf) biçimini oluşturmak için yeni bir parça ekler. Buna karşılık, çıkarma kuralları LHS biçiminden bir parçayı çıkarmaktadır. Bölme kurallarında, LHS biçimi iki veya daha fazla parçaya bölünürken dış hatlar bozulmaz. Değiştirme kuralları, LHS biçiminin geometrik unsurlarını korurken oran, yön veya doğrultu gibi özelliklerini değiştirmektedir. Son olarak,

yer değiştirme kurallarında, RHS biçimi, LHS biçiminin tamamının yerini alır ve iki biçim önemli ölçüde farklı olabilir; örneğin, bir kare bir dairenin yerini alabilir (Şekil 2.11).

Şekil dilbilgisi uygulaması

Şekil dilbilgisi, başlangıç şeklinden yola çıkarak şekil kurallarıyla dönüşümler yaparak tasarım oluşturan formal bir prosedür belirleyen bir üretim sistemidir. Uygulamanın her adımında olası sol taraf (LHS) şekillerini tespit etmek ve eşleştirerek ilgili kuralları uygulamak kritik öneme sahiptir; bu süreç, üretilen tasarımdan eşleşen LHS şekilleri kalmayana kadar devam eder. Şekil dilbilgisini uygulamak ayrıca aşağıdaki üç konunun dikkate alınmasını gerektirir:

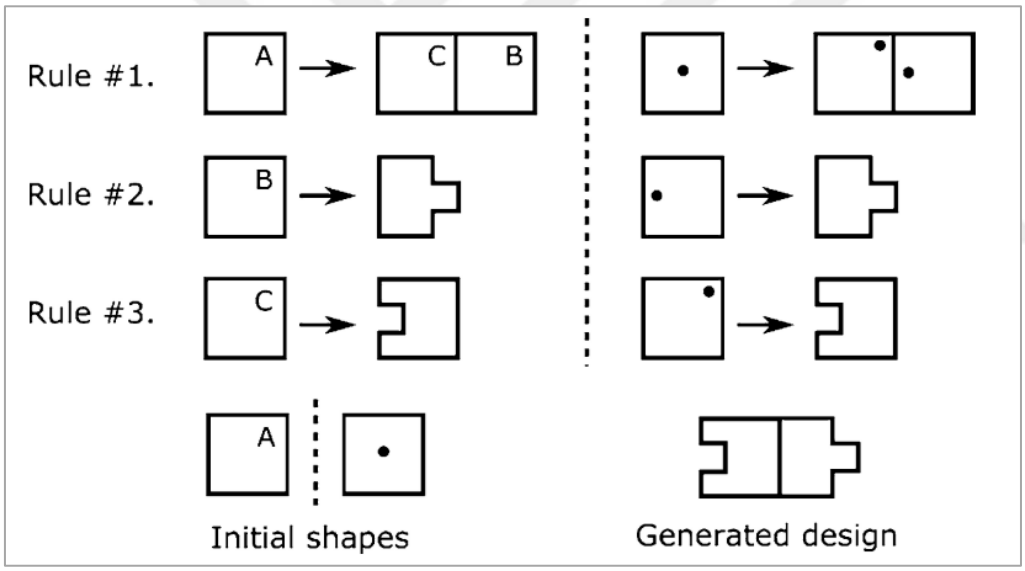
- Birden fazla LHS şekli tespit edilirse, bunlardan biri veya bazıları önceliklendirilir mi? Eğer öyleyse, hangi şekil(ler) ve kural(lar)?
- Ayrıca bu önceliklendirme ve seçim süreçleri nasıl kolaylaştırılır ve kim tarafından yapılır?
- Şekil tespiti sırasında, şekil dilbilgisi, tasarımcıların şekilleri serbestçe ayırmasına ve yeniden birleştirmesine izin verir. Bu özellik, önceden tanımlanmamış ancak ortaya çıkan şekilleri ifade eden emergence olarak adlandırılır. Bir şekil dilbilgisi uygulamasında emergence nasıl uygun şekilde ele alınmalıdır?

Şekil dilbilgisinin daha fazla geliştirilmesi, bu üç temel endişeyi çeşitli karar verme düzeylerine göre esnek bir şekilde ele alır. Örneğin, şekil dilbilgisi tamamen sınırsız olabilir, birden fazla kuralın esnek bir sırayla aynı anda uygulanmasına izin verir; veya hem kural seçimi hem de uygulama için sıkı kontrollerle belirleyici olabilir (Knight, 1999).

Karar verme sürecini yönetmek için şekil dilbilgisi uygulaması sırasında hangi kuralların ve hangi sırayla uygulanacağını belirlemek ile ne derece emergence'ın etkinleştirileceğini saptamak amacıyla bir dizi kontrol mekanizması kullanılır. Bu bölüm, kontrol mekanizmalarını üç genel seviyeye ayırmaktadır: içsel, dışsal ve paralel. İçsel mekanizmalar esasen geometriktir. Kurallardaki şekiller, birden fazla kuralın uygulanmasına izin veren veya vermeyen bir biçimde tanımlanır; bu, kural uygulama sırasını belirlemek ve olası şekil emergence'ını öngörmek için önemlidir. Bu seviyeye "içsel" terimi atfedilmektedir; zira bu

mekanizmalar yalnızca şekil dilbilgisinin temel bileşenlerini oluşturan geometrik şekillerle ilişkilidir.

İkinci kategori "dışsal" olup, bir dış ajanın – insan ya da bilgisayar – karar verme sürecinde tam bir yetki sahibi olmasına imkan tanır. Kural seçimi, uygulama ve sonlandırma kriterleri, belirli tasarım standartları ile birlikte tercihlerin yanı sıra zaman, süreç ve ölçek kısıtlamalarının karşılanması gibi unsurlar bu kategori altında değerlendirilebilir. Üçüncü kontrol kategorisi "paralel" olarak adlandırılmakta olup, dış ajanın karar verme sürecini etkileyen seçilen faktörlerin şekiller ve kuralların içine dahil edilmesi ile tanımlanabilir. Bu bağlamda, şekiller geometrik olmayan açıklamalar veya sembollerle birlikte sunulmaktadır. Bu noktada, daha önce bahsedilen "etiketler" kavramı uygulanabilir bir hale gelmektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Farklı etiketler kullanan iki açıklama çeşidi: Harfler (sol) ve noktalar (sağ)

Daha basit bir formda, açıklamalar yalnızca LHS (Sol Taraf Şekli) şekillerinin kural uygulaması için tespitini kontrol etmek amacıyla kullanılan çeşitli işaretler (semboller, etiketler, yan geometrik özellikler vb.) olarak temsil edilebilmektedir. Bu yaklaşım, şekil dilbilgisi geliştirmede en yaygın olanıdır (Stiny, 1980). Daha ayrıntılı bir formda açıklamalar, işlev veya şekille ilgili anlamsal göstergeler içerebilir. Bu açıklamaların önemli bir rolü, LHS (sol taraf) şekillerinin tespitini kolaylaştırmaktır (Stiny, 1981). Başka bir deyişle, açıklamalar, ortaya çıkan tasarımda LHS şekillerini etkili bir şekilde tespit edip eşleştirmek için şekil oluşumunu kontrol eder. Açıklamalar, görsel taramanın zorlaştığı veya

beklenmeyen şekil oluşumlarının etkili bir şekilde yönetilemediği daha karmaşık şekillerde özellikle önem arz etmektedir. Şekil 2.12, bazı açıklama örneklerini ve bunların kullanımını göstermektedir. Yukarıda tartışılan pratik kullanımlarına ek olarak, açıklamalar, şekil dilbilgilerinin gelişimi ve genişletilmesi üzerinde de önemli bir etkiye sahip olabilir. Açıklamalar aracılığıyla, geometrik olmayan unsurları şekillerle birleştirmek mümkündür. Bu bağlamda, şekiller saf geometriler yerine sembolik nesneler haline gelmiştir. Bu anlayış, "Temel Şekil Dilbilgilerinin Genişletmeleri" bölümünde özetlendiği gibi, çeşitli şekil dilbilgisi genişletmelerinin ortaya çıkmasının ana nedenidir. Açıklamalar, orijinal şekil dilbilgilerinin mekansal dilbilgisi (McKay ve diğerleri, 2012), tasarım dilbilgisi (Pauwels ve diğerleri, 2015) ve set dilbilgisi (şekiller önceden tanımlanmış bir kümenin üyeleri olarak ele alınır) (Garcia, 2017) gibi diğer dilbilgilerinin gelişimi ve uygulanmasına da ilham vermiştir.

2.7. Dijital ve Hesaplamalı Tasarımın Geleceği

Mimarlıkta dijitalleşme ve üretken tasarımın gelecekteki potansiyeli, hesaplamalı tasarım ve yapay zeka[1] (AI) alanındaki ilerlemelerle desteklenen büyük bir alandır. Tanımlanmış parametrelere dayalı olarak çok sayıda tasarım seçeneğini keşfetmek için algoritmalar kullanan üretken tasarım, giderek mimari tasarım süreclerine entegre edilmektedir. Bu entegrasyon, yalnızca yaratıcılığı artırmakla kalmaz, aynı zamanda bina tasarımında performansı ve sürdürülebilirliği optimize etmektedir. Üretken tasarım, yenilikçi mimari formlar ve çözümler üretmek için Derin Öğrenme[2] tekniklerinden, özellikle Generatif Rekabetçi Ağlar[3] (GAN'ler) ve varyasyonel otoenkoderlerden[4] faydalanır. Bu teknolojiler, mimarların karmaşık tasarım alanlarını keşfetmesine olanak tanıyarak birden fazla tasarım alternatifini hızlı bir şekilde oluşturmalarını sağlar. Örneğin, GAN'lerin plan oluşturma ve konsept görselleştirme gibi mimari görevlerde uygulanması, tasarım sürecini önemli ölçüde geliştirme potansiyelini ortaya koymuştur (Dortheimer, Schubert, Dalach, Brenner ve Martelaro, 2023; Newton, 2019). Ayrıca AI kullanarak metinsel açıklamalardan yüksek kaliteli mimari tasarımlar üretmek, dijital araçların mimarların yaratıcı yeteneklerini nasıl

[1] Artificial Intelligence
[2] Learning Techniques
[3] Generative Adversarial Networks
[4] Variational Autoencoders

yükseltebileceğinin bir örneğidir; bu, mimarların verimli çıktılar üretmesini sağlamaktadır (Chen, 2023).

Üretken tasarımın mimari süreçle entegrasyonu, parametrik tasarım uygulamaları aracılığıyla daha da geliştirilmiştir. Parametrik tasarım, mimarların tasarım değişkenlerini dinamik bir şekilde manipüle etmelerine olanak tanıyarak çevresel faktörlere ve kullanıcı ihtiyaçlarına etkin bir şekilde yanıt vermelerini sağlar. Araştırmalar, çevresel faktörlerin tasarım sürecinin başında dikkate alınmasının, bina performansını iyileştirebileceğini ve çevredeki mikro iklimle daha iyi bir etkileşim kurmasına katkıda bulunabileceğini göstermektedir (Kabošová, Katunský ve Kmet, 2020). Bu yaklaşım, sağlam tasarım üreticileri geliştirmek için tasarım sorunlarının etkili bir şekilde çerçevelenmesinin önemini vurgulayan Luyten'in bulgularıyla uyumludur (Luyten, 2022).

Ayrıca mimarlık eğitimindeki dijital dönüşüm, gelecekteki mimarların bu gelişmiş araçları etkin bir şekilde kullanmaya hazırlanmasını sağlamak açısından hayati bir öneme sahiptir. Bilgisayar destekli mimari tasarımın (CAAD) evrimi, mimari pratiğin ayrılmaz bir parçası haline gelmiş olup, dijital okuryazarlığı ve üretken algoritmaların kullanımını vurgulayan bir müfredatın gerekliliğini ortaya koymaktadır (Abdalla, Rashid ve Ara, 2021). Dijital teknolojiler gelişmeye devam ettikçe, eğitim kurumları, öğrencilerin dijital olarak yönlendirilen bir mimarlık ortamında başarılı olmaları için parametrik ve üretken tasarım araçlarını içeren öğretim metodolojilerini uyarlamalıdır (Sunarya, Subiyantoro, Harmunisa ve Maharani, 2022).

Daha geniş ölçekte, üretken tasarım ve hesaplamalı tasarımın entegrasyonu, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), dijital üretim ve makine öğrenimi gibi teknolojileri birleştiren işbirlikçi çerçeveler aracılığıyla kolaylaştırılabilir. Bu teknolojiler, performans metriklerine dayalı gerçek zamanlı değerlendirmeler ve ayarlamalar yapma imkânı sunarak tasarım süreçlerini optimize etmek amacıyla sinerji içerisinde çalışabilir (Mésároš, 2021; Zardo, Mussi ve da Silva, 2019).

Sonuç olarak, mimarlığın geleceği, dijitalleşme ve üretken tasarım tarafından önemli ölçüde şekillenecektir. Bu teknolojileri benimseyerek, mimarlar yaratıcı süreçlerini geliştirebilir, bina performansını optimize edebilir ve modern tasarım zorluklarına daha etkili bir şekilde yanıt verebilirler. Mimarlık eğitiminin ve uygulamalarının devam eden evrimi, bu

potansiyelin gerçekleştirilmesinde kritik bir rol oynamakla kalmayacak, aynı zamanda bir sonraki nesil mimarların bu güçlü araçları etkin bir biçimde kullanmaya hazır olmalarını sağlayacaktır.

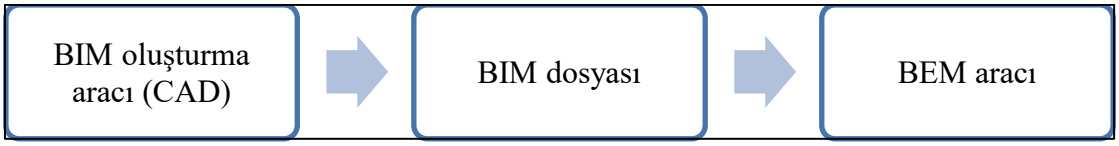
3. BİNA ENERJİ MODELLEMESİ TABANLI BİNA BİLGİ MODELLEMESİ

Bina bilgi modellemesi (BIM), bir binanın enerji performansının projenin ilk aşamalarından itibaren değerlendirilmesini kolaylaştırabilir (Ramaji, Messner ve Mostavi, 2020). Piyasada yaygın olarak kabul edilen birkaç BIM yazılımı uygulaması mevcuttur ve her uygulama kendi özel dosya formatını kullanır. Bina enerji performansını tahmin etmek üzere bina tasarımını yönlendirmek için BIM tabanlı bina enerji modelleme (BEM) yöntemlerini kullanmak giderek daha popüler hale gelmiştir. Bu yöntem, özellikle gelecekteki tasarım, yani bütünleşik tasarım süreci için uygundur ve aynı zamanda erken tasarım aşamasında da uyarlanabilir (Gao, Koch, 2019). Araştırmacıların çoğu, erken tasarım aşamasında verilen tasarım kararlarının binaların maliyeti, enerji verimliliği ve genel performansı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu kabul etmektedirler (Echenagucia, 2015).

Binaların enerji tüketimi ve dolaylı karbon emisyonları üzerindeki olumsuz etkilerine yönelik artan farkındalık, tasarım uzmanları arasında enerji kodu uyumluluk eşiklerinin ötesinde projeler tasarlamak ve tüm bina enerji optimizasyonunu elde etmek için artan bir ilgi uyandırmaktadır. Önceden belirlenmiş bir bina tasarımının başarısız olup olmadığını analiz etmek yerine, tasarım geliştirme sürecinin son aşamalarında bir uyumluluk sağlamak için tasarımcılar, bina performansı ve kullanıcı konforu üzerinde en büyük etkilere sahip olan kararları belirlemek amacıyla tasarımın erken aşamalarında hızlı ve yinelemeli performans geri bildirimleri almakla giderek daha fazla ilgilenmektedirler (Konis, Gamas ve Kensek, 2016).

Konis ve arkadaşları (Konis, 2016), tasarımcıların onaylanmış aydınlatma ve enerji simülasyon araçlarını kullanarak pasif çevre sistemlerinin erken tasarım aşamasındaki uygulamalarını inceleyip optimize etmelerini sağlayan bir tasarım çerçevesi ve simülasyon tabanlı iş akışı geliştirmişlerdir. Bu çalışma, tasarım sürecinde pasif çevre stratejilerinin kullanımını artırmayı hedeflemektedir.

Bina bilgi modellemesi (BIM) tabanlı bina enerji modellemesi süreci, katkıda bulunan farklı bileşenlerden oluşmaktadır. Her bir bileşeni ayrı ayrı incelemek, zorlukları ve sorunlarıyla ilgili çözümlerin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Şekil 3.1'de, bina bilgi modellemesi tabanlı bina enerji modellemesi sürecine genel bir bakış gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Bina bilgi modellemesi tabanlı bina enerji modellemesi sürecine genel bakış

3.1. BIM-BEM Teknolojik Yaklaşımları

Önerilen teknolojik yaklaşımlar, farklı model entegrasyon yöntemleri ve teknik yönler tarafından yönlendirilir. Bu nedenle, bu yöntemler öncelikle teknolojik makalelerin gözden geçirilmesini desteklemek için bir temel olarak tartışılmaktadır. BIM ve BEM araçlarının nasıl entegre edileceği veya bağlanacağı, BIM-BEM sürecinin en zorlu kısmıdır. Negendahl (2015) ve Toth, Janssen, Stouffs, Chaszar ve Boeykens (2012) tarafından yürütülen çalışmalarda tanımlandığı gibi, model entegrasyonu için üç yöntem bulunmaktadır: birleşik, merkezi ve dağıtılmış yöntemler. Ancak yapılan araştırmalara göre, BIM tabanlı BEM sürecinin birlikte çalışabilirlik sorununu halletmek için literatürde beş yöntem mevcuttur.

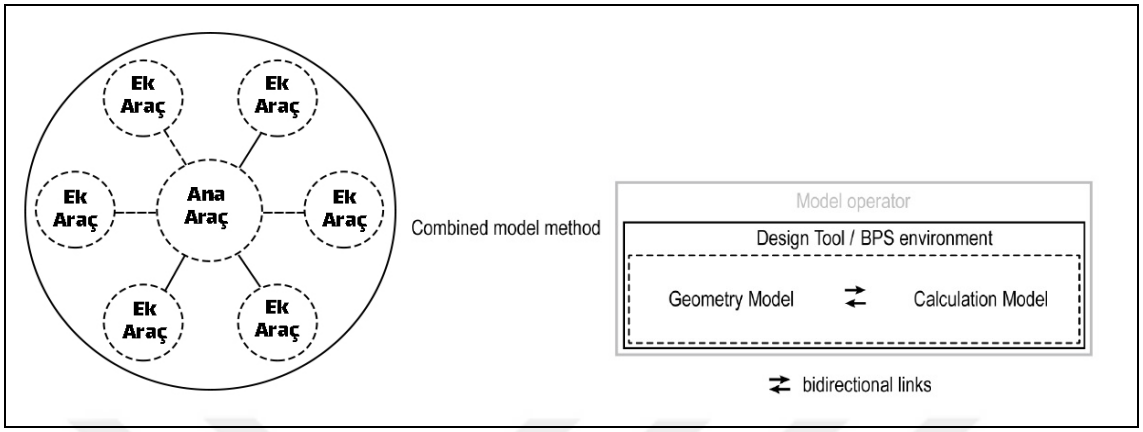
1. Birleşik model yöntemi[1]
2. Merkezi model yöntemi[2]
3. Uygulama zinciri[3]
4. Ara yazılım aracı[4]
5. Değişim gereksinimi[5]

3.1.1. Birleşik model yöntemi

Simülasyon paketleri, örneğin IESVE (Integrated Environmental Solutions), birleşik bir model içerir (Şekil 3.2) ve operatörün model üretiminin ve simülasyonunun tüm adımlarında modelin hassasiyetini kontrol edebilme avantajına sahiptir. Birleşik model, hem modellemeyi hem de simülasyonları çalışma zamanı seviyesinde idare edebilir ve birçok kullanıcı için çekici bir özellik olan ortamın tutarlılığını sağlayabilir. Birleşik bir modelin belirgin avantajı, tasarım aracı işlevlerinin ve simülasyon aracı işlevlerinin esas olarak entegre olması ve böylece araç alanı entegrasyonunun mümkün hale gelmesidir. Ancak bu

[1] Combined model method
[2] Central model method
[3] tool-chain
[4] Middleware tool
[5] Exchange requirement

yöntemin temel dezavantajı, kullanıcının belirli bir ortam veya program tarafından sunulan seçenekler ve özelliklerle sınırlı olmasıdır (Negendahl, 2015).



Şekil 3.2. Birleşik model. Aynı ortamda bir tasarım aracı ve BPS'den oluşur. (Negendahl, 2015)

Negendahl (2015), entegre dinamik modeli dağıtık modelin özel bir durumu olarak tanımlamaktadır. Entegre bir dinamik model, dinamik olarak bir görsel programlama diline (VPL[1]) bağlı bir tasarım aracında kontrol edilen ve yine bir bina performans simülasyonu (BPS) ortamına dinamik olarak bağlanan bir geometrik modelden oluşan birleşik bir modeldir. Ara yazılım, simülasyonist veya bina tasarımcısı tarafından veya her ikisi tarafından tanımsız bir operatör tarafından çalıştırılabilir (Negendahl, 2015).

Abanda ve Byers (Abanda ve Byers, 2016), bina yöneliminin bina enerji tüketimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için Revit ve GBS'yi kullanmışlardır. Revit ve GBS uygulamaları, BEM araçlarında bina geometrisinin yeniden yaratılmasına gerek kalmadan bina yönelimleri açısından hızlı tasarım seçeneklerinin oluşturulmasını sağlamıştır. Benzer şekilde, Kim gbXML veri şemasına dayalı BIM tabanlı GBS simülasyonu kullanarak pencere boyutu, konum ve yönelimin bina enerji yükü üzerindeki etkisini değerlendiren bir çalışma yürütmüştür. BIM tabanlı GBS simülasyonu, bina modelinin parametrik olarak kontrol edilmesini ve enerji simülasyonu için tasarım alternatiflerinin hızla oluşturulmasını sağlar (S. Kim, Zadeh, Staub-French, Froese ve Cavka, 2016).

Birleşik modeller, modelleme ortamının işlevleriyle sınırlı olsa da, çoğu birleşik model, diğer araçlardan içe ve dışa geometriyi destekler; ancak harici araçlar arasındaki iki yönlü

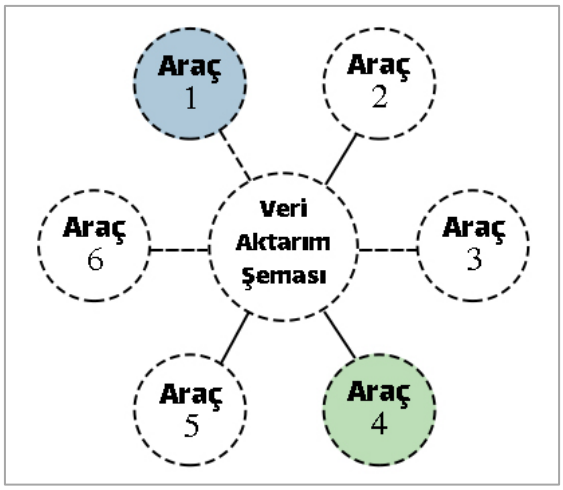
[1] visual programming language

güncellemelerin dinamiklerini desteklemez. Simülasyon paketlerini ve birleşik modelleri kullanmanın zorlukları, katılan tüm katılımcıların modeller arasındaki yüksek yakınsamayı sürdürmek için aynı temel aracı kullanmayı kabul etmeleridir. Bu bağlamda, daha büyük koordine edilmemiş gruplarda ve gevşek disiplinler arası projelerde birleşik hesaplama modellerini kullanmak zor olabilir.

3.1.2. Merkezi model yöntemi

Merkezi model (Şekil 3.3), yaygın olarak kullanılan bir merkezi çerçeveye dayanmaktadır. Bina bilgi verilerini paylaşılan bir veri şemasında merkezileştirme kavramı, tipik olarak bir BuildingSmart girişiminin erken etkileriyle ilişkilendirilir (BuildingSmart.org, 2013). Çeşitli araçlar aynı modeli okuyup yazabilir ve böylece bir tasarım aracından gelen anlamsal bilgileri bir BEM ortamına bağlayabilir. Bir birleştirme ortamı olarak IFC'ye dayanan yeni yöntemlerden RenewBIM ve Simergy (LBNL, 2014) ile gbXML için OpenStudio (NREL ABD Enerji Bakanlığı, 2014) bahsedilebilir. BIM araçları ve BEM araçları, bu tür açık formatlar aracılığıyla veri alışverişine daha yeni başladığından, tasarım aracının mı yoksa enerji modelleme aracının mı yakınsamayı idare etmesi gerektiği konusunda bir fikir birliği yok gibi görünmektedir. Rose ve Bazjanac (Rose ve Bazjanac, 2015), geometrik (CAD) bir modelden IFC uyumlu uzay sınırları oluşturmak için bir ara algoritma kullanmayı ve böylece BPS dostu geometri oluşturma sürecine yardımcı olmayı önermektedir (Rose ve Bazjanac, 2015).

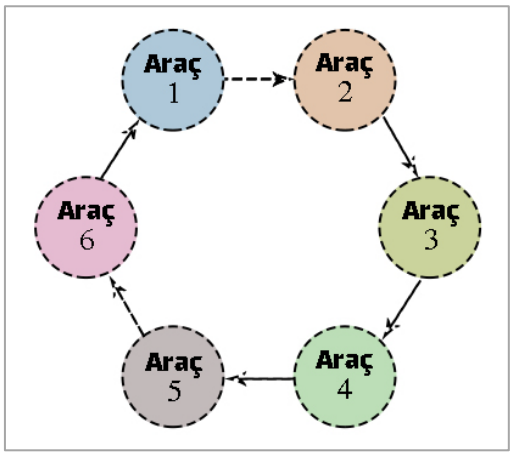
Diğer otomatik veya yarı otomatik algoritmaların uygulanması, otomatik termal bölgeleme veya karmaşık bina geometrisinin basitleştirilmesi gibi, BIM araçları ile BEM araçları arasındaki bağlantı sürecini otomatik hale getirmek için tasarım araçlarında, BEM araçlarında veya IFC şemasının kendisinde gerekli olacaktır.



Şekil 3.3. Merkezi model yöntemi

3.1.3. Uygulama zinciri

BIM dosyaları ile enerji simülasyon araçları arasındaki veri alışverişi ile ilgili sorunların riskini azaltmak için bazı çalışmalar, geleneksel yöntemler yerine BIM uygulama programı arabirimi (API[1]) yöntemini kullanmayı önermektedir. API, Revit, ArchiCAD veya Bentley gibi doğrudan BIM araçlarından bağımsız bir BIM dosyası geliştirmek olarak tanımlanabilir (Jeong, Kim, Clayton, Haberl ve Yan, 2014; Kim, Jeong, Clayton, Haberl ve Yan, 2015).



Şekil 3.4. Uygulama zinciri yöntemi

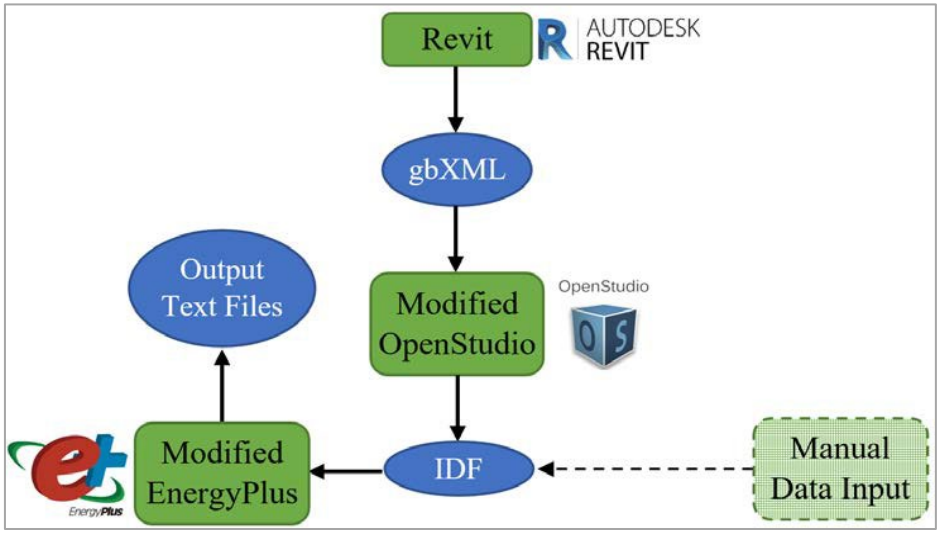
Bu yöntem, BIM ile enerji simülasyonu arasındaki veri alışverişini gerçekleştirmek için özel yazılım (çoğu durumda BIM yazılımının API'si) kullanır. Böyle bir yaklaşım, genel bir birlikte çalışabilirlik çözümü olarak düşünülmese de bazı çekici noktalar sunmaktadır.

[1] Application Program Interface

Sorunsuz bir veri aktarımına izin verir çünkü yazılımın API'si veri bilgi modeliyle tamamen uyumludur; ancak her zaman tüm dahili veri yapısını açığa çıkarmaz. Sonuç olarak veri kaybı ve uyumsuzluk sınırlanırken bir operasyonel iş akışının uygulanması sağlanır.

Asl, erken tasarım sırasında farklı tasarım seçeneklerinin tanımlanmasını kolaylaştırmayı amaçlayan bina bilgi modellemesi tabanlı performans optimizasyonu (BPOpt) çerçevesini önermektedir. Farklı araçlar arasındaki birlikte çalışabilirlik sorununun üstesinden gelmek için veri alışverişi sürecinde Autodesk Revit'in API'si kullanılır (Asl, Zarrinmehr, Bergin, Yan ve Buildings, 2015). Benzer şekilde, Jeong BIM ve simülasyon arasında sorunsuz bilgi alışverişi sağlamak için Modelica kitaplığıyla birlikte Autodesk Revit™ API'sini kullanmaktadır (Jeong ve Kim, 2016).

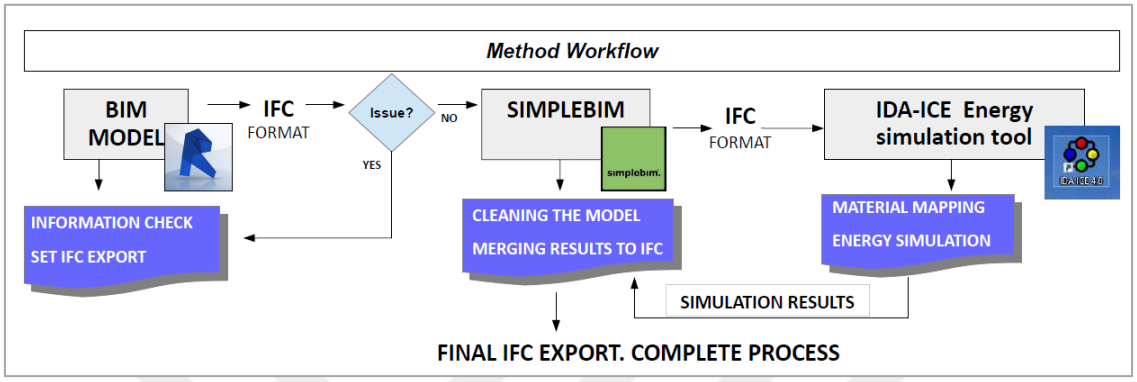
Kamel ve Memari, 2018'de BIM kullanarak enerji modellemesi yapmak için yeni bir yazılım aracı tanıtmış ve yapı kabuğu bileşenleri yoluyla ısı transferini ayrıntılı çıktılar sağlamaktadır. Bu araç, EnergyPlus ve OpenStudio kaynak kodları kullanılarak geliştirilmiştir ve onu enerji analizi için giriş veri dosyasına (IDF[1]) dönüştüren gbXML dosya şemasıyla uyumludur. Bu aracın genel görünümü Şekil 3.5'de gösterilmektedir (Kamel ve Memari, 2018).



Şekil 3.5. Otomatik enerji simülasyonu için geliştirilmiş bilgisayar aracına genel bakış (Kamel ve Memari, 2018)

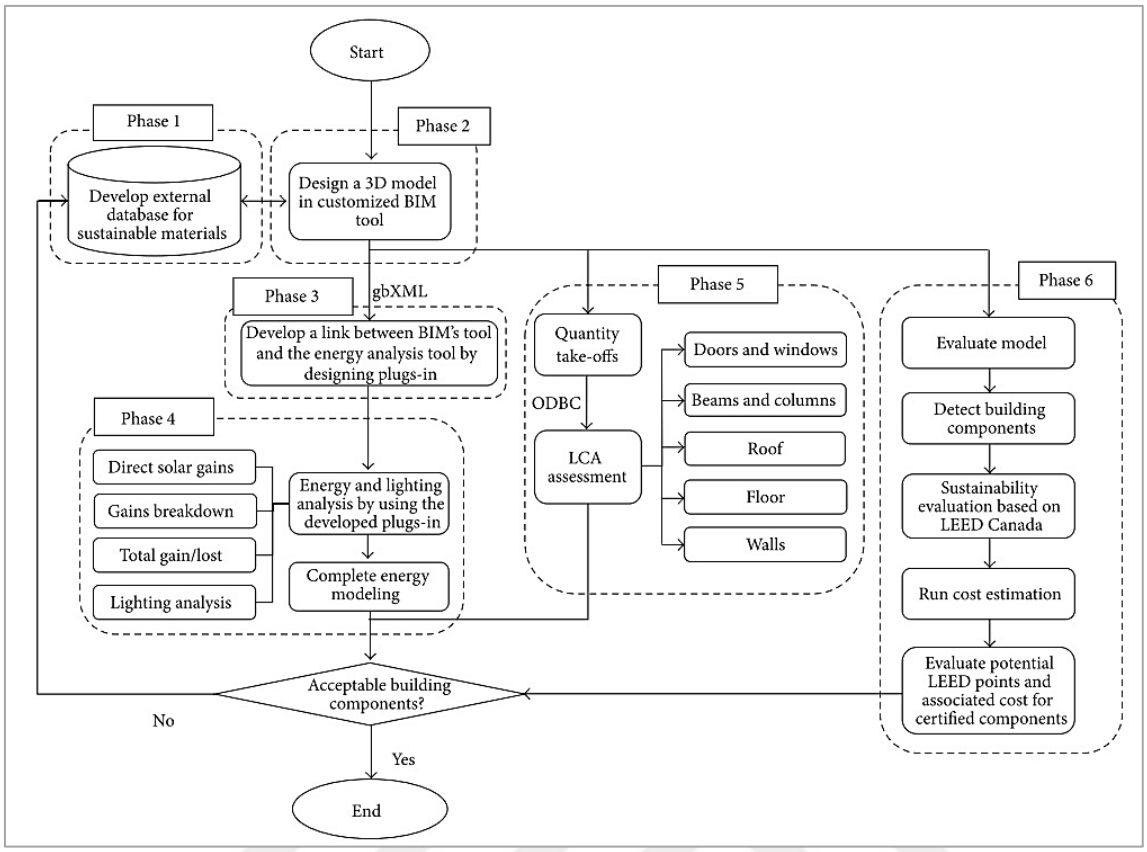
[1] Input Data File

Spiridigliozzi (2019) binaların enerji performans değerlendirmesi için BIM-BEM birlikte çalışabilirliğini optimize etmeye izin veren yeni bir iş akışının uygulanmasını ve test edilmesini amaçlayan bir yöntem sunmuşlardır (Spiridigliozzi, Pompei, Cornaro, De Santoli ve Bisegna, 2019).



Şekil 3.6. BIM tabanlı enerji simülasyonu süreci: IFC formatı üzerinden SIMPLEBIM ve IDA-ICE entegrasyonu (Spiridigliozzi, 2019)

Jalaei ve Jrade (Jalaei ve Jrade, 2014a), enerji ve gün ışığı bakımından tasarım seçeneklerini analiz ederek mimari tasarım ekibinin binaları daha sürdürülebilir hale getirmesine yardımcı olmayı amaçlayan entegre bir platform önerdiler ve uyguladılar. Projenin amaçlarından biri, gbXML ve IFC veri şemasına dayalı bir Revit eklentisi geliştirerek Revit ve Ecotect'i yeşil bina sertifikasyon sistemine entegre etmektir. IFC tabanlı dönüşümle karşılaştırıldığında, gbXML tabanlı dönüşüm yalnızca geometrik bilgileri değil, aynı zamanda konum, bina tipi ve inşaat atamalarını içeren yeterli değişiklikler yaparak daha iyi geliştirilmiştir. Termal bölgeler, Revit'te oluşturulan tüm alanların BEM için termal bölgelere dönüştürülmesiyle tanımlanır (Jalaei ve Jrade, 2014b). Ancak, dönüştürme işlemi sırasında bazı eksik bilgilerin (örneğin, malzemeler) kullanıcı tarafından manuel olarak girilmesi gerekir ve gbXML dosyasındaki değişikliklerin karmaşık bir süreç olduğu varsayılmaktadır.

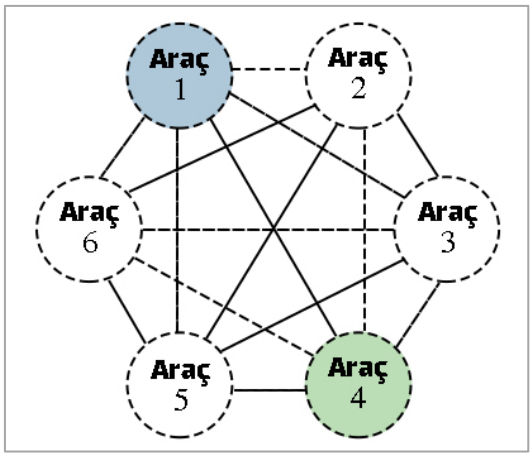


Şekil 3.7. Entegrasyon sürecinin akış şeması (Jalaei ve Jrade, 2014a)

Asl (2015), erken tasarım sırasında farklı tasarım seçeneklerinin tanımlanmasını kolaylaştırmayı amaçlayan bina bilgi modellemesi (BIM) tabanlı performans optimizasyonu (BPOpt) çerçevesini önermektedir. Farklı araçlar arasındaki birlikte çalışabilirlik sorunlarının üstesinden gelmek için veri alışverişi sürecinde Autodesk Revit'in API'si kullanılmaktadır (Asl, 2015).

3.1.4. Ara yazılım aracı

Ara yazılım araç yöntemi, IFC ve gbXML gibi açık kaynaklı veri modellerine dayanmaktadır. Bu yöntem, BIM'den çıkarılan bilgilerin kontrol edilebildiği ve gerektiğinde düzeltilip zenginleştirilebildiği çeşitli araçlar ve ara yazılımlar geliştirilerek farklı birlikte çalışabilirlik sorunlarını ve BIM yazılımının sınırlamalarını ele alır.



Şekil 3.8. Ara yazılım araç yöntemi

BIM aracı ile BIM dosyası arasında çalışan bir ara katman yazılımı geliştirmek, birlikte çalışabilirlik sorunlarını çözmek için bir çözümdür. Yu, 2014 yılında BIM tabanlı BEM sürecindeki mevcut sorunların üstesinden gelmek amacıyla Revit'ten IFC dosyasını okumak verileri almak ve gerekli bilgileri çıkarmak için BIMserver ve Query Generator'ı kullanarak bir ara katman yazılımı geliştirmiştir. Temel amaç, binanın geometri verileriyle ilgili sorunları çözmek ve OpenStudio'da enerji simülasyonu için düzeltilmiş bir dosya sağlamaktır (Yu, 2014).

2013 yılında Kim ve Anderson, Ifcxml formatı ile DOE 2.2 enerji simülasyon analizi arasındaki bilgi alışverişini (özellikle geometri) kolaylaştırabilecek başka bir Ruby tabanlı araç önermiştir. Ancak, malzeme özelliklerinin ve HVAC sistem verilerinin modele manuel olarak entegre edilmesi gerekmektedir (Kim ve Anderson, 2013).

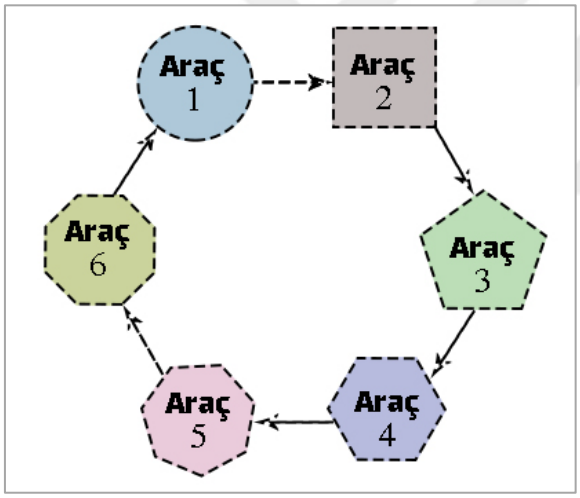
Aynı kategoride O'Donnell BIM veri modeli ile simülasyon modelleri arasındaki boşluğu doldurmak için ara veri modeli SimMODEL'i önermektedir. SimModel, BIM veri modelinin bilgilerini ve enerji simülasyon araçlarının gereksinimlerini (başlangıçta EnergyPlus için) sıralar.

Benzer şekilde, Kim bir IFC dosyasını ayrıştırabilen, malzemenin adını tanımlayabilen ve DOE 2.2 simülasyon motoru için bir girdi dosyası oluşturmak üzere bir veritabanından karşılık gelen özelliklerini bulabilen bir araç geliştirmişlerdir (Kim, 2016). Choi ise bir malzeme kitaplığının geliştirilmesini ve malzeme bilgilerini alabilen, EnergyPlus için bir IDF girdisi oluşturabilen bir iş akışı önermektedir (Choi, Shin, Kim ve Kim, 2016). Aynı

kategoride O'Donnell BIM veri modeli ile simülasyon modelleri arasındaki boşluğu doldurmak için ara veri modeli SimMODEL'i önermektedir. SimMODEL, BIM veri modelinin bilgilerini ve enerji simülasyon araçlarının gereksinimlerini (başlangıçta EnergyPlus için) sıralar (O'Donnell, 2012).

3.1.5. Değişim gereksinimi

Bu yöntem, enerji simülasyonu için bina ile ilgili gerekli tüm bilgileri içeren bir BIM'i hedefler. BIM (IFC) yetenekleri, değiştirilen dosyanın enerji simülasyonu için gereken değişim gereksinimlerini karşılaması amacıyla genişletilir. Bu strateji, EN ISO 29481'den Model Görünüm Tanımları (MVD) ile Bilgi Teslim Kılavuzu (IDM[1]) metodolojisini ve veri modelinin kendisini (EN ISO 16739'da tanımlandığı gibi IFC) içeren açık BIM çerçevesinin esnekliğine dayanır.

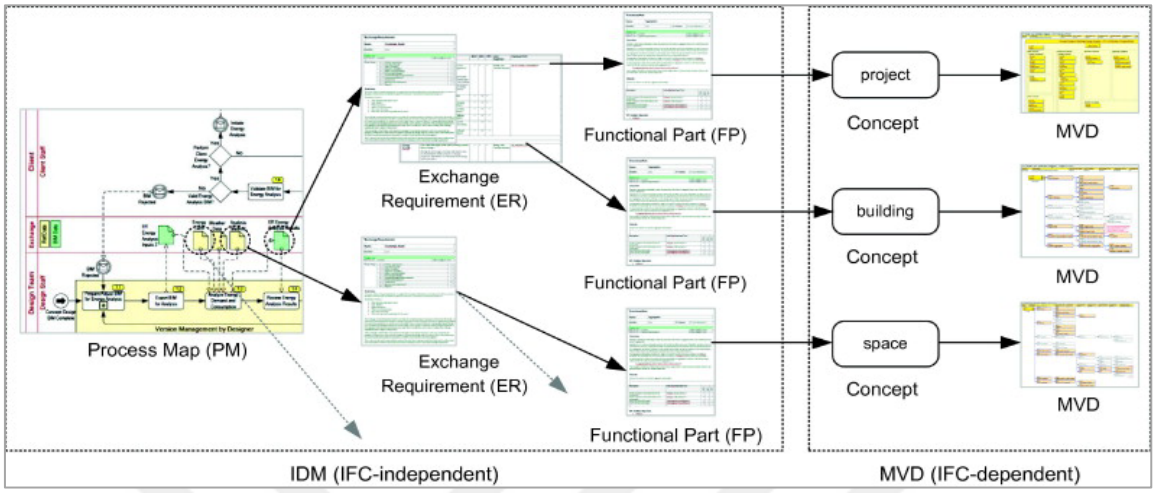


Şekil 3.9. Değişim gereksinimi

Bu yaklaşım, özel bir araca veya formata dayanmadığından, simülasyon değişim gereksinimleriyle doğrudan uyumlu bir IFC dosyasına sahip olmanın, yinelenen iş ve bilgileri önlediği için en esnek yaklaşım olarak kabul edilebileceği ifade edilmektedir (Andriamamonjy, Saelens ve Klein, 2019). MVD'ler, sektördeki belirli bir süreç için yazılım araçları geliştirmek amacıyla kullanılır. Şekil 3.10, değişim gereksinimlerini tanımlamak için bir çerçevenin iki farklı bölümünü temsil etmektedir. İlk bölüm, aktörler tarafından kontrol edilen bir sürecin bileşenlerini ve belirli süreçle ilişkili değişim gereksinimlerini

[1] Information Delivery Manual

açıklamaktadır. İkinci bölüm ise meta-model şemasına dayalı olarak iki farklı yazılım uygulaması arasındaki arayüzü tanımlamaktadır.



Şekil 3.10. Değişim gereksinimlerini tanımlamak için çerçeve (Lee, Park ve Ham, 2013)

Daha sonra Cemesova IFC ile Pasif Ev Planlama Paketi (PHPP) arasındaki birlikte çalışabilirlik sorunlarını ele almaktadır. IFC'nin değişim gereksinimlerini kısmen karşılayan mevcut kısımlarını tanımlarlar ve PHPP için değişim gerekliliğini yerine getirmek için yeni varlıklar ve ilişkiler sunarlar Pinheiro EnergyPlus veya Modelica (özellikle AixLib Modelica kitaplığı ile) kullanarak bina enerji performansı simülasyonu için değişim gereksinimini yakalamak ve çevirmek için IDM ve MVD teknolojisini kullanan standart bir yaklaşım önerdi. Andriamamonjy IFC4 ve Modelica arasında doğrudan bilgi alışverişini sağlamak için IDM ve MVD'ye dayalı benzer bir yaklaşım geliştirdiler. Bu yaklaşım, BIM'deki sistem ve kontrol modellerinin yanı sıra geometri modellemeden simülasyon modeline eksiksiz bilgi aktarımı sağlar. Standart ve farklı konseptler olgunlaşmış ve kanıtlanmış olsa da, bu stratejilerin ana sınırlamaları şu anda gerekli iş akışlarının yavaş benimsenmesinde ve farklı BIM yazılım uygulamalarının IFC4 ve özel MVD'lerle hâlâ yetersiz uyumlu olmasını da saptanmış. Ramaji bina bilgi modellerini bina enerji modellerine dönüştürmek için BIMserver'da geliştirilen ve uygulanan bir algoritmayı sunmaktadır. Algoritma, açık standart IFC formundaki bir BIM modelini OpenStudio (OSM) için açık formattaki bir enerji modeline dönüştürmek için uygulandı Bu algoritmada çift yönlü veri alışverişi olmasına rağmen optimizasyon uygulanamaz.

Daha sonra Cemesova, IFC ile Pasif Ev Planlama Paketi (PHPP) arasındaki birlikte çalışabilirlik sorunlarını ele almaktadır. IFC'nin değişim gereksinimlerini kısmen karşılayan

mevcut kısımlarını tanımlamış ve PHPP için değişim gerekliliğini yerine getirmek amacıyla yeni varlıklar ve ilişkiler sunmuşlardır (Cemesova, Hopfe ve McLeod, 2015). Pinheiro ise EnergyPlus veya Modelica (özellikle AixLib Modelica kitaplığı ile) kullanarak bina enerji performansı simülasyonu için değişim gereksinimlerini yakalamak ve çevirmek için IDM ve MVD teknolojisini kullanan standart bir yaklaşım önermişlerdir (Pinheiro, 2018).

Andriamamonjy, IFC4 ve Modelica arasında doğrudan bilgi alışverişini sağlamak amacıyla IDM ve MVD'ye dayalı benzer bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yaklaşım, BIM'deki sistem ve kontrol modellerinin yanı sıra geometri modellemeden simülasyon modeline eksiksiz bilgi aktarımı sağlamaktadır. Standart ve farklı konseptler olgunlaşmış ve kanıtlanmış olsa da, bu stratejilerin ana sınırlamaları, gerekli iş akışlarının yavaş benimsenmesi ve farklı BIM yazılım uygulamalarının IFC4 ve özel MVD'lerle hâlâ yetersiz uyumlu olmasıdır (Andriamamonjy, Saelens ve Klein, 2018).

Ramaji ise bina bilgi modellerini bina enerji modellerine dönüştürmek için BIMserver'da geliştirilen ve uygulanan bir algoritmayı sunmaktadır. Bu algoritma, açık standart IFC formatındaki bir BIM modelini OpenStudio (OSM) için açık formattaki bir enerji modeline dönüştürmek üzere uygulanmıştır (Ramaji, 2020). Ancak, bu algoritmada çift yönlü veri alışverişi olmasına rağmen optimizasyon uygulanamamaktadır.

Çizelge 3.1. BIM tabanlı enerji modelleme süreçlerinde karşılaşılan problemler, önerilen çözümler, kullanılan yöntemler ve teknolojik yaklaşımlar

Kaynak	Yıl	Problem	Çözüm	Yöntem	Teknolojik Yaklaşımları	Tasarım Aşaması
(Negendahl, 2015)	2015	Veri Aktarımı (Geometri)	VPL dili ile geometri model oluşturmak	VPL dili	Birleşik model	İlk aşama
(Jalaei, 2015)	2014	Veri kaybı	BIM aracına eklenti tasarlamak	IES-VE plugin	Uygulama zinciri	Yaşam döngüsü
(Asl, 2015)	2015	Birlikte çalışabilirlik	Veri alışverişi sürecinde Autodesk Revit'in API'si kullanılır	(BPOpt) çerçevesini	Uygulama zinciri	İlk aşama
(Rose ve Bazjanac, 2015)	2015	Veri Aktarımı (Geometri ve material)	IFC ile CAD modellerini BEM geometrisine dönüştürmek için bir algoritma sunulmak.	Algoritma	Merkezi model	-

Çizelge 3.1. (devam) BIM tabanlı enerji modelleme süreçlerinde karşılaşılan problemler, önerilen çözümler, kullanılan yöntemler ve teknolojik yaklaşımlar

Kaynak	Yıl	Problem	Çözüm	Yöntem	Teknolojik Yaklaşımları	Tasarım Aşaması
(Abanda ve Byers, 2016; S. Kim, 2016)	2016	Tasarım alternatiflerini karşılaştırmak	BIM tabanlı GBS simülasyonu	BIM tabanlı GBS	Birleşik model	İlk aşaması
(E. Kamel ve A. M. Memari, 2018)	2018	Birlikte çalışabilirlik	BIM kullanarak enerji modellemesi yapmak için yeni bir yazılım aracı tanıtmış (ABEMAT)	ABEMAT aracı	Uygulama zinciri	Tasarım süreci (yapı kabuğu bileşenleri)
(Spiridigliozzi, 2019)	2019	Birlikte çalışabilirlik	Enerji performans değerlendirmesi için BIM-BEM sürecini optimize eden yeni iş akışı	EQUA tarafından geliştirilen IDA ICE	Uygulama zinciri	İlk aşama
(Jalaei ve Jrade, 2014a)	2014	Veri Aktarımı (Geometri)	gbXML ve IFC veri şemasına dayalı Revit ve Ecotect'i LEED sistemine entegre etmektir	Entegrasyon süreç	Uygulama zinciri	Kavramsal Tasarım
(N. Yu, 2014)	2014	Veri Aktarımı (Geometri)	OpenStudio'da enerji simülasyonu için düzeltilmiş	BIMserver ve Query Generator	Ara yazılım araç	-
(H. Kim ve Anderson, 2013)	2013	Veri Aktarımı (Geometri)	DOE 2.2 enerji simülasyon analizi arasındaki bilgi alışverişini kolaylaştırabilecek	Ruby tabanlı araç	Ara yazılım araç	-
(Choi, 2016)	2016	Veri Aktarımı (Material)	Malzeme bilgilerini alabilen ve EnergyPlus için bir IDF	İş akışı	Ara yazılım araç	Gelişmiş aşama
(Cemesova, 2015)	2015	Birlikte çalışabilirlik	IFC ile Pasif Ev Planlama Paketi (PHPP) arasındaki birlikte çalışabilirlik ele almış.	PHPP için değişim gerekliliğini	Değişim gereksinimi	Gelişmiş aşama
(Andriamamonjy, 2018)	2018	Birlikte çalışabilirlik	IDM ve MVD'ye dayalı bir yaklaşım geliştirdiler	IFC4 ve Modelica	Değişim gereksinimi	Gelişmiş aşama
(Ramaji, 2020)	2020	Birlikte çalışabilirlik	BIMserver'da geliştirilen ve uygulanan bir algoritma sunmakta.	Algoritme geliştirmek	Değişim gereksinimi	Gelişmiş aşama
(Ratajczak, Siegele ve Niederwieser, 2023)	2023	Tasarım alternatiflerini karşılaştırmak	RBFOpt algoritması ile yöntem sunulmaktadır	Algoritme geliştirmek	Uygulama zinciri	İlk aşama

Literatür araştırmalarına dayanarak, Çizelge 3.2'de BIM tabanlı BEM için teknolojik yaklaşım yöntemleri karşılaştırılmaktadır. Uygulama zinciri yöntemi, araştırma hedeflerine ulaşmak için en uygun yöntem olabilir.

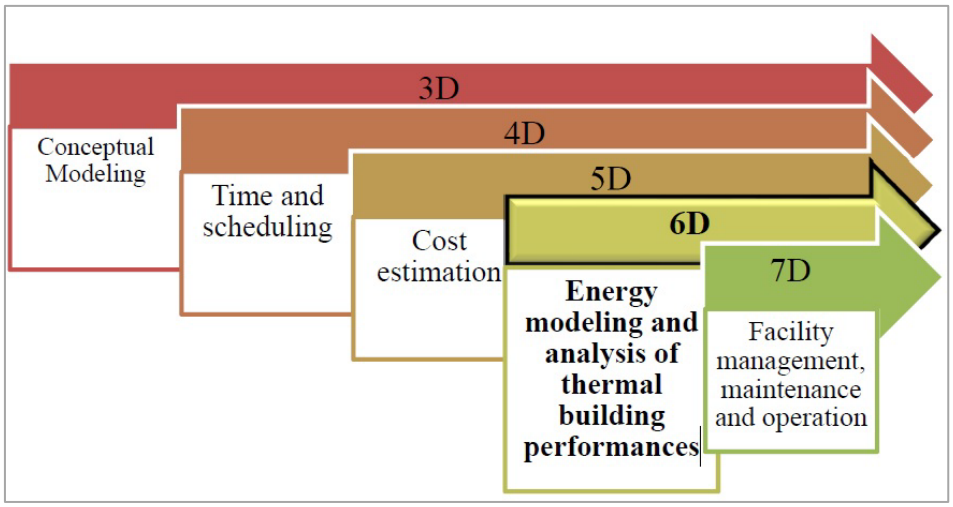
Çizelge 3.2. BIM tabanlı BEM için teknolojik yaklaşımlar yöntemleri karşılaştırmak

	Hız	Veri Aktarımı	Optimizasyon	Tasarım ilk aşaması
Birleşik model yöntem	✓	✓	✓	✓
Merkezi model yöntemi	✗	✗	✗	✗
Uygulama zinciri	✗	✓	✓	✓
Ara yazılım aracı	✓	✗	—	✗
Değişim gereksinimi	✓	✓	✗	✗

3.2. BIM Kavramı

BIM, kullanıcıların tasarlanan modeli paylaşmak için farklı araçlarla birlikte çalışabilirlik avantajlarından yararlanmasını sağlar. Birlikte çalışabilirlik, iki ayrı sistem veya yazılım programı arasında iletişim ve veri alışverişi yeteneğidir (Lilis, Giannakis ve Rovas, 2017). BIM'in bu yeteneği, diğer yazılımlarda aynı bilgilerin yeniden modellenmesini engeller. Bu nedenle, bir BIM modelini BIM dışı modelleme araçlarına veri değiştiriciler aracılığıyla bağlamak, bu teknolojinin zamandan, kaynaklardan ve emekten tasarruf sağlama ile riski azaltma açısından önemli bir etkisidir (Lilis, 2017). BIM tabanlı bir projenin iletişimi ve veri alışverişi, tüm iç ve dış taraflar arasında, gelişmiş işbirliği ve koordinasyona olanak tanıyan paylaşım modeli aracılığıyla yapılabilir.

Teknik açıdan, bir bina, bina bilgilerinin tüm yönlerini birden fazla boyutta paylaşılabilen 3B sanal bir formatta (Eastman, 2011) içeren uygun bir BIM aracı kullanılarak dijital olarak inşa edilebilir. Tüm bina yaşam döngüsü boyunca binaların fiziksel ve fiziksel olmayan özelliklerini tanımlamak için yedi BIM boyutu bulunmaktadır (Charef, Alaka ve Emmitt, 2018), bu boyutlar Şekil 3.11'de gösterilmektedir (Olsson ve Lagerlöf, 2018).



Şekil 3.11. BIM'in farklı boyutları

Şekil 3.11'de gösterildiği gibi, BIM 6D, optimize edilmiş bir binanın enerji analizine odaklanır. BIM tabanlı veri paylaşım özelliği sayesinde, farklı profesyonellere, erken tasarımdan ayrıntılı tasarım ve işletim aşamalarına kadar enerji performansı analizini tamamlamak için çeşitli enerji simülasyon araçlarıyla bilgi alışverişi yapma fırsatları sunar.

Bina tasarımı, çeşitli disiplinlerin katkıda bulunduğu, doğası gereği kolektif ve işbirlikçi bir süreçtir. Bu süreç, bilgi modellerinin birçok kez değişimini içerir. BIM modeli, öğeler (u değeri, maliyet, eğim vb.) ve aynı zamanda parametreler (çatı, zemin, duvar, pencere) hakkında bilgileri içeren bir 3B modeldir. Model, yapısal tahminler ve enerji analizi yapmak için değerli bilgiler içerdiğinden, bu parametreler son derece önemlidir. Bunlar ayrıca maliyet tahmini, çakışma tespiti ve tesis yönetiminde önemli bir rol oynayabilir. BIM'in standart programları arasında en yaygın olarak kullanılanlar ArchiCAD ve Revit'tir (Kensek, 2015). Model bilgi ile zenginleştirildiği ve anlamsal olarak zengin 3B veri modellerinin değiş tokuşuna olanak tanıdığı için BIM kullanmak büyük avantaj sağlar.

BIM, tasarım ve mühendislik kararları aşamalı olarak alınırken, farklı aşamalarda modellerin düzenli olarak iyileştirilmesine olanak tanır. Geometrik ve grafik bilgiler açısından bu kademeli iyileştirmeler, Gelişim Düzeyi (LOD[1]) olarak adlandırılabilir (Abualdenien ve Borrmann, 2019).

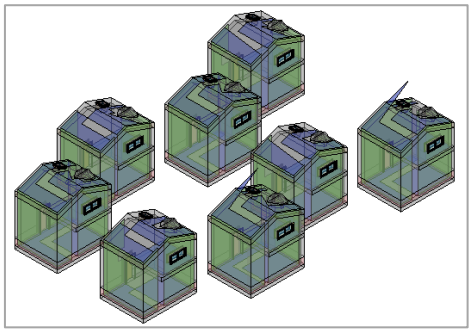
[1] Level of Development

3.2.1. BIM uygulamaları

Allplan (Nemetschek tarafından), ArchiCAD (Graphisoft tarafından), Microstation (Bentley Systems tarafından), Revit (Autodesk tarafından) ve Vectorworks (Nemetschek tarafından) gibi çeşitli yazılımlar, BIM CAD programları olarak adlandırılmaktadır. Örneğin, Epstein'ın yaptığı bir araştırmada, enerji modellemesi için BIM'i kullanmak amacıyla, IFC aracılığıyla enerji simülasyon motoru olarak EnergyBuild kullanılarak ArchiCAD tercih edilmiştir (Epstein, 2012). Revit ve ArchiCAD, en yaygın ve en çok kullanılan BIM uygulamalarından ikisidir. Bir sonraki bölümde, Revit ve ArchiCAD için enerji arayüzleri incelenmektedir.

Revit için enerji analizi

Revit'teki Enerji Analizi (EA) yerleşik bir özelliktir. Erken aşamalarda kavramsal kütlelerden, gelişmiş aşamalarda ise yapı elemanlarından enerji modelleri oluşturur. EA, enerji modelini arka planda Green Building Studio'ya (GBS) yükler ve yaşam döngüsü enerji maliyeti ile yenilenebilir enerji potansiyelini vurgulayan bir enerji raporu üretir. Aslında, DOE-2 tabanlı simülasyon motoru GBS, kapsamlı bina enerji performansı (BEP) analizleri gerçekleştirir ve tüm Autodesk enerji simülasyon araçlarına güç sağlar.

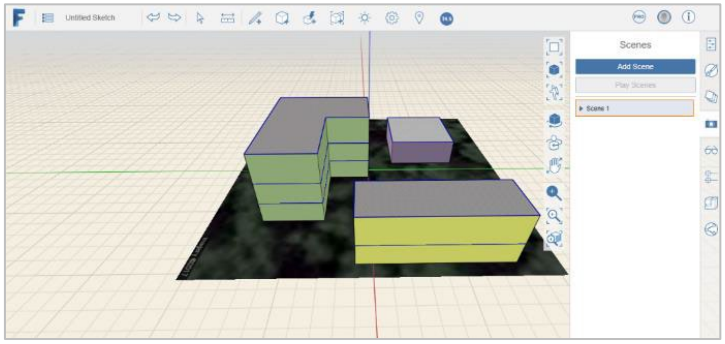


Şekil 3.12. Bir konut modeli için Revit'te 3D enerji modeli

FormIt ve Revit için insight

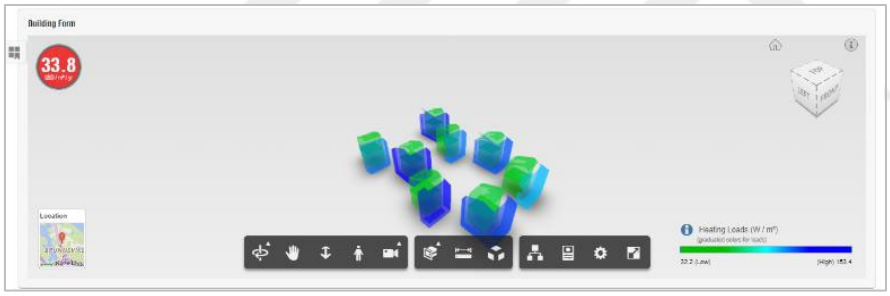
Insight, hem FormIt Pro hem de Revit için eklentiler sunar ve manipülasyonu kolaylaştırmak amacıyla bulut tabanlı bir arayüze sahiptir. Autodesk FormIt, erken aşama odaklı bir tasarım aracıdır. Basit yapı hacmi oluşturulmasına imkan tanır ve daha ayrıntılı modelleme için Revit'e aktarılabilir. Ayrıca, Revit ailelerini kendi içerik kitaplığına dönüştürebilir. FormIt

için Insight eklentisi, simülasyonu çalıştırmadan önce projenin konumlandırılmasını ve en az bir katı nesnenin seviye ile ilişkilendirilmesini gerektirir.



Şekil 3.13. FormIt web uygulama arayüzü

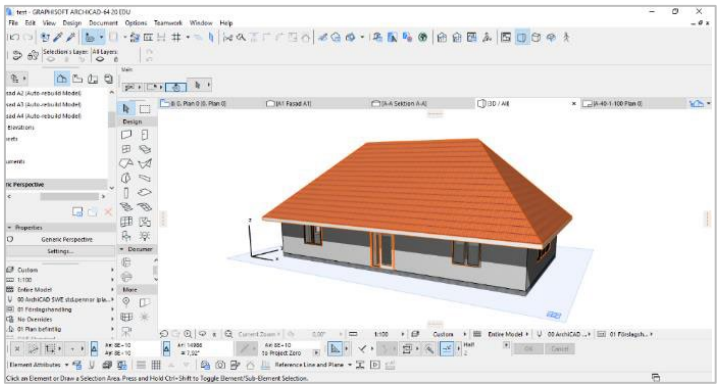
Insight, enerji performansının yanı sıra aydınlatma ve güneş enerjisi analizleri de sağlar ve ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanması için EnergyPlus'a güvenir. Ayrıca, yüklerin ve PV panellerin görselleştirilmesine de olanak tanır.



Şekil 3.14. Insight'ta ısıtma yükleri görselleştirmesi

Energy evaluation (EE)

Energy Evaluation, Graphisoft ArchiCAD'in yerleşik bir özelliğidir. VIP-Energy'ye dayanan bu analiz, bina modelinin enerji performansını değerlendirmek için termal bölgelerin sınırlarının, yapısının ve programlarının doğru bir şekilde tanımlanmasını gerektirir. Sonuçlar, enerji tüketimi, enerji dengesi ve çevresel etkileri kapsayan bir enerji raporu şeklinde sunulur.



Şekil 3.15. ArchiCAD'de konut modeli

Gelişim düzeyi, LOD (100-400)

Bina 3B modeli, etiketlenmiş nesnelerden oluşan birçok öğeden meydana gelir. Bu nesnelerin her biri, görsel bir temsile ve onlarla ilişkili özelliklere sahiptir. Nesneler, maliyet, miktar, enerji ve benzeri farklı kriterlere göre dışa aktarılabilir veya analiz edilebilir. Başarılı bir analiz için, bu nesnelerin bilgi içermesi gerekir. Eğer bir modelde nesneler bilgi içermiyorsa, bu model dijital bir model değil, sadece bir mimari modeldir. Dijital modellerin ölçeği yoktur. Bu bağlamda AIA, BIM modellerindeki geometrik çözünürlüğü ve ayrıntı derecesini anlamak için LOD kavramını uluslararası bir standart olarak belirlemiştir (Borrmann ve diğerleri, 2018). Çizelge 3.3, mevcut LOD seviyelerinin her birinin kısa bir tanımını sunmaktadır.

Çizelge 3.3. Tasarım sürecinde LOD için belirtilen her seviyenin tanımı (Ulusal Yapı Şartnamesi)

LOD	Tanım
100	Bu seviyede, modeldeki yapı elemanları için tahmini grafik bilgileri (genel alan veya toplam hacim gibi) sağlanır.
200	Bu seviyede, modeldeki yapı elemanları için genel bir sistem olarak yaklaşık grafiksel ve grafiksel olmayan bilgiler (yaklaşık boyut, şekil, konum ve yön gibi) sağlanır.
300	Bu seviyede, modeldeki yapı elemanları için özel bir sistem olarak proje kökenine göre doğru grafiksel ve grafiksel olmayan bilgiler (detaylı malzeme ve miktarlar gibi) sağlanır.
400	Bu seviyede, modeldeki yapı elemanları için özel bir sistem olarak proje menşei ile ilgili olarak çok detaylı grafiksel ve grafiksel olmayan bilgiler (detaylı imalat, montaj ve kurulum gibi) sağlanır.

3.3. BIM Dosyası

BIM dosya formatları, BIM tabanlı BEM sürecinin ikinci halkasıdır. En yaygın türlerden ikisi, binaların farklı yönleri hakkında bilgi içerebilen IFC ve gbXML dosyalarıdır. CAD araçları gibi BIM araçlarında kullanılabilecek farklı BIM dosya formatları geliştirilmiştir. Sırasıyla BuildingSmart ve Green Building Studio Inc. tarafından yayımlanan Industry Foundation Class (IFC) ve Green Building XML (gbXML), her biri kendine özgü özelliklere sahip en kapsamlı BIM dosya biçimlerinden ikisidir. Bu formatların her ikisi de enerji simülasyonu için gerekli bilgilerin bir kısmını sağlayabilir.

IFC, 2005 yılında BuildingSmart olarak yeniden adlandırılan International Alliance for Interoperability (IAI) tarafından geliştirilen uluslararası bir standarttır. Mevcut IFC4 sürümü 2013 yılında BuildingSmart tarafından piyasaya sürülmüş olup, IFC5 hâlâ planlama aşamasındadır. Gelişmelerden biri, alan sınırlarına odaklanan enerji ve performans analizi, mekânsal bölgeler, dış alanlar ve gölgeleme cihazlarının eklenmesi ile ilgilidir (Kamel ve Memari, 2019).

GbXML formatı ise bir binanın bölgeleri, yüzeyleri, inşaat tipleri, pencere düzeni ve binanın çevresi hakkında bilgi içerebilir (El Asmi, Robert, Haas ve Zreik, 2015). Bununla birlikte, birçok simülasyon aracının gbXML tarafından sağlanan HVAC sistemleri ile ilgili verileri anlamakta zorlandığı kaydedilmiştir (O'Donnell, 2012).

3.3.1. IFC (Industry foundation classes)

IFC[1] veri formatı ISO sertifikalıdır ve ilk olarak 1996 yılında Uluslararası Birlikte Çalışabilirlik Derneği (IAI)[2] tarafından geliştirilmiştir. IFC, BIM tarafından kullanılan tek açık ve standart 3D nesneye yönelik değişim modudur. İnşaat ve tesis yönetimi endüstrilerinde süreç iyileştirme ve bilgi paylaşımı için evrensel bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır (Bazjanac, 2008). IFC, çok disiplinli takımlar arasında veri transferine ulaşmak için bir fırsat sağlar. Bina geometrisi açısından, IFC'nin genel yaklaşımı, bina geometrisinin herhangi bir şeklini temsil edebilir (Gourlis ve Kovacic, 2017). Son

[1] Industry Foundation Classes
[2] International Association for Interoperability

zamanlarda, birçok araştırmacı IFC'yi ortam olarak kullanarak BIM tabanlı BEM geliştirmeye çalışmıştır.

3.3.2. gbXML (Green building XML)

Yazılım sektöründeki bazı firmalar, gbXML veri şemasını kullanarak BIM tabanlı BEM özellikli analiz araçları geliştirmiştir. Green Building Studio (GBS), IES Virtual Environmental (IES-VE), Ecotect ve Trace 700 en ünlü örneklerdir. Autodesk tarafından geliştirilen GBS, bina geometrisi, konum, malzeme bilgisi (varsayılan termal özellikler) ve mekan ve bölge bilgilerinin Revit'ten dönüştürülebileceği BIM tabanlı BEM uygulama potansiyeline sahiptir. Enerji simülasyonu DOE-2'ye dayanarak web servisine entegre edilmiştir. Ancak, dönüştürme işlemi sırasında yanlış gölgelendirme mekan tanımları ve bazı öğelerin (örneğin, zemin) ihmal edilmesi gibi sorunlar ortaya çıkabilir; bu durum bina simülasyonunda sapmalara neden olabilir. EnergyPlus ve eQUEST, gbXML dosyasını GBS üzerinden dolaylı olarak alabilir. Ecotect, basit kararların nihai proje üzerinde geniş kapsamlı etkilere sahip olabileceği tasarımın en erken aşamalarını hedefleyen bir başka Autodesk ürünüdür (Calquin, Wandersleben ve Castillo, 2014). Geometri ve sadeleştirilmiş bölge bilgisini (tüm boşlukları tek bir termal bölge olarak) gbXML tabanlı Revit modelinden içe aktarabilir. BEM için gereken diğer bilgiler, varsayılan bilgiler olarak veya manuel girişle ayarlanır. İçe aktarma sırasında bazı geometrik çeviri hataları bulunmaktadır. Ek olarak, şu ana kadar Ecotect'e güncelleme/servis yapılmamaktadır; bu, uyumsuzluk hatalarının kalıcı olarak var olabileceği anlamına gelir (Calquin, 2014).

Azhar ve diğ. (Azhar, Brown ve Farooqui, 2009), BIM yazılımları (örn. Revit, ArchiCAD) üzerinden Ecotect, Green Building Studio (GBS) ve IES-VE'ye gbXML aracılığıyla veri aktarım adımlarını belirttiler ve bu yazılımların bina performans analizi özellikleri açısından avantajlarını ve dezavantajlarını analiz ettiler. GBS, Revit modelinden az miktarda hazırlık çalışmasıyla gbXML analizine hızlı veri dönüşümünü sağlar ve otomatik gbXML hata kontrolü işlevine sahiptir. Ancak, gbXML verilerini GBS içindeki çevrimiçi veri tabanına bağlamak zordur. IES-VE için doğrudan bir Revit eklentisi bulunmaktadır ve IES-VE, yaşam döngüsü ve bina performans değerlendirmesini sağlar. Ancak veri dönüşümü sırasında IES-VE ve Ecotect için daha fazla hazırlık çalışması ve gbXML hata kontrolü gereklidir. Trace 700, enerji simülasyonunu bazı şablon kütüphaneleriyle yürütmek için gbXML dosyasındaki bina bilgilerini kullanabilen, LEED derecelendirme işlevleriyle

entegre bir başka BEM aracıdır (Gao, Koch, 2019). Ticari BEM yazılımları, BIM kullanarak gbXML yoluyla enerji modeli oluşturma işlemini desteklemek için geliştirilmiş olmasına rağmen, güvenilir bir enerji modeli yalnızca manuel model kontrolleri ve modifikasyonlarından sonra elde edilebilir. Bu nedenle, birçok araştırmacı mevcut gbXML tabanlı yöntemlerin sınırlamalarını belirlemeye ve akademik araştırma alanındaki gbXML tabanlı yöntemlerde bazı gelişmeler sağlamaya çalışmıştır.

3.3.3. gbXML ve IFC arasındaki karşılaştırma

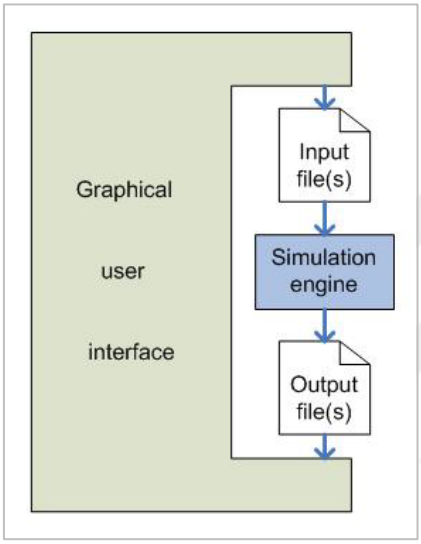
İki ana BIM şeması formatının, yani IFC ve gbXML'nin hem genel özellikleri hem de enerji simülasyonu ile ilgili veriler açısından yetenekleri arasındaki farklar Çizelge 3.4'te özetlenmiştir. Her iki dosya formatının mevcut sürümleri XML kullanır, ancak farklı yaklaşımlar benimser. gbXML ve IFC için sırasıyla yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya veri yapısı yaklaşımları kullanılmaktadır. Her ikisi de malzeme özellikleri, HVAC sistemleri için sınırlı veriler ve termal bölge verileri sağlar; ancak konumlarla ilgili veriler yalnızca gbXML dosya biçiminde mevcuttur. IFC dosya formatının özelliklerinden biri, yapısal tasarım veya enerji analizi gibi bir projenin belirli alanlarını hedefleyen IFC dosyasının alt kümeleri olarak Information Delivery Manual (IDM) ve Model Görünüm Tanımı (MVD) tanımlama yeteneğidir.

Çizelge 3.4. Literatür taramasına dayalı gbXML ve IFC arasındaki karşılaştırma

Özellikleri	gbXML	IFC
Bina geometrisinin sunumu	Sadece dikdörtgen geometri	Herhangi bir geometri
Veri yapısı	XML (eXtensible Markup Language)	IFC, PKZIP, and XML
Uygulama alanı	Çoğunlukla enerji simülasyonu alanı	Bina inşaatından bina operasyonuna kadar farklı alanlar
Termal bölgelerin tanımlama yeteneği	Evet	Evet
Konum	Evet	Hayır
Belirli bir model türü ve alt kümeler için minimum içerik standardı	Hayır	Evet – IFC ve IDM yetenekleri için MVD standardı vardır
Malzeme kalınlığı	Evet	Evet
HVAC sistemiyle ilgili sınırlı veriler	Evet	Evet

3.4. BEM Kavramı

BEM araçları, Grafik Kullanıcı Arayüzü (GUI)[1] ve simülasyon motoru dahil olmak üzere iki bileşenden oluşabilir (Maile, Fischer ve Bazjanac, 2007). OpenStudio, BEopt, DesignBuilder ve eQuest gibi GUI'ler, kullanıcılara grafik arayüz sağlayarak enerji modelleme sürecini kolaylaştırır. Bununla birlikte, ikinci bileşen, yani EnergyPlus ve DOE2 gibi enerji simülasyon motorları, bu araçların arkasında çalışır. Şekil 3.16'da GUI ve simülasyon motorunun birlikte çalışması gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Bina enerji simulasyonuna genel bakış (Maile, Fischer ve Bazjanac, 2007)

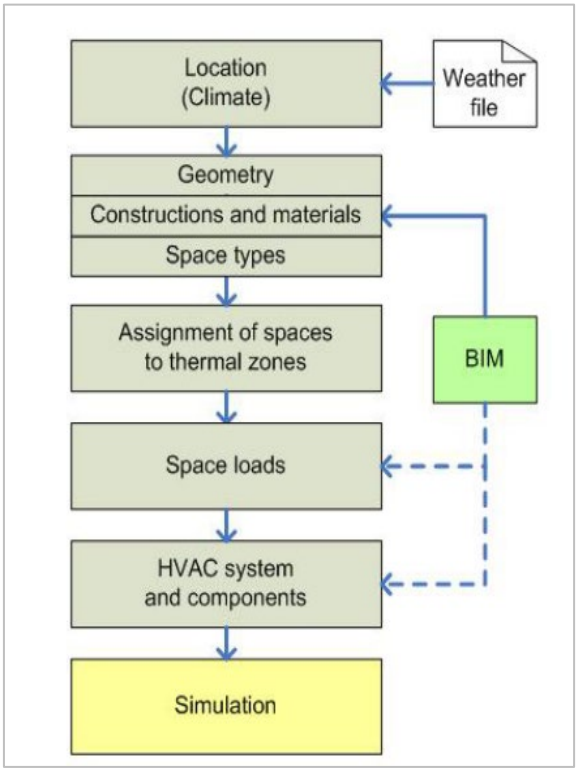
Enerji simülasyonu GUI ve enerji simülasyon motoru arasında bir fark vardır. Enerji simülasyon arayüzleri, enerji modelleme sürecini sadece binanın geometrik modelini veya enerji tüketim verilerini içeren ayrıntılı grafikler geliştirmek de dahil olmak üzere, giriş ve çıkışlar için daha fazla grafik arayüz sağlayarak kolaylaştırır. OpenStudio, DesignBuilder, BEopt veya eQuest gibi bu arayüzler simülasyonu doğal olarak gerçekleştirmez ve farklı matematiksel araçlara ve termodinamik denklemlere dayanan analizi gerçekleştiren EnergyPlus veya DOE2 gibi enerji simülasyon motorlarının entegrasyonuna ihtiyaç duyar. EQuest veya TRNSYS gibi diğer araçlar da enerji simülasyon motorları altında kategorize edilir. Şu anda, EnergyPlus ve DOE2 gibi büyük enerji simülasyon motorlarının hiçbiri, gbXML ve IFC gibi BIM dosyalarını CAD araçlarından doğrudan içe aktaramaz. Bununla birlikte, OpenStudio, IES-VE, GBS, IDA ICE, RIUSKA ve Ecotect gibi BIM dosyalarını

[1] Graphical User Interface

kullanma kapasitesine sahip enerji simülasyonu GUI'leri bulunmaktadır. BIM dosyasını içe aktaran ve EnergyPlus gibi enerji simülasyon motorları için uygun bir format olan bir metin dosyası üreten Space Boundary Tool (SBT) gibi dosya üreteçleri de mevcuttur (Maile, 2007; Pinheiro, Wimmer, Maile ve O'Donnell, 2016). GUI'ler, CIM+ ve Ruby gibi farklı dillerde kodlanabilen ve BIM dosyalarından enerji simülasyonuna uygun diğer dosya biçimlerine dosya dönüştürmeyi gerçekleştiren yerleşik işlevlere sahiptir. Şekil 3.17, genel enerji simülasyon araçlarının enerji simülasyon GUI veya simülasyon motoru altında nasıl toplandığını göstermektedir.

Energy simulation GUI only	Energy simulation engine	Independent energy simulation engine with graphical interface
OpenStudio *DesignBuilder* *Hevacomp* *Simergy* *BEopt*	⟷ EnergyPlus	Ecotect TRNSYS IDA ICE ApacheSim (used in IES VE) EDSL Tas Modelica language (can be used with graphical interfaces such as Dymola)
GBS eQuest RIUSKA	⟷ DOE2	

Şekil 3.17. Enerji simülasyon araçlarının kategorileri (Kamel ve Memari, 2019)



Şekil 3.18. Enerji performansı simülasyon araçları için ideal iş akışı (Maile, 2007)

Enerji performansı simülasyon araçları için ideal iş akışı (Maile, 2007) Şekil 3.18'de gösterilmiştir. İlk adım, hava verilerine bağlantı sağlayan binanın konumunu tanımlamaktır. İkinci adım, ideal olarak bir BIM'den veri aktararak bilgi sağlamaktır. Bu bilgi, gerekli 3B geometri bilgilerini, yapı ve malzeme tanımlarını ve genellikle mimar tarafından tanımlanan alan tiplerini içermelidir. Geometrinin basitleştirilmesi, ilgili enerji performansı simülasyon aracının geometri tanımına uymalıdır. Bu geometri tanımlarına dayanarak, kullanıcı arayüzü boşlukları bölgelere toplama (ve boşlukları bölgelere alt bölümlere ayırma) sağlamalıdır. Bir sonraki adımda, alan yükleri (aydınlatma yükleri gibi), BIM bağlantısı yoluyla içe aktarılan belirli uygun alan türlerine atanmalıdır. Simülasyon gerçekleştirilmeden önce HVAC sistemlerinin ve bileşenlerinin tanımlanması gerekecektir. Bu, manuel kullanıcı girişi veya BIM'den yarı otomatik HVAC bilgilerinin içe aktarılması yoluyla yapılmalıdır. İkincisi açıkça tercih edilse de, enerji simülasyon araçları için HVAC ile ilgili veri aktarımını sağlamak amacıyla hala önemli geliştirme, uygulama ve testlerin yapılması gerekmektedir. Tüm bu veriler tanımlandıktan sonra, ek simülasyona özgü parametrelerin (sayısal toleranslar, simülasyonun başlangıç ve bitiş tarihi vb.) girilmesi durumunda hızlı bir şekilde (şu anda olduğundan daha hızlı) bir simülasyon gerçekleştirilmelidir.

3.4.1. Simülasyon motorları

BEMS araçları genellikle bağımsız, tüm bina enerji analizini gerçekleştiren bilgisayar programlarıdır. Genellikle simülasyon motorları olarak adlandırılan bu bilgisayar programları, sistemlerin belirli özelliklerini tanımlamak için bir dizi girdi verisi gerektiren çeşitli bina enerji sistemlerinin fiziksel modellerine dayanmaktadır. Simülasyon motorları, bir veya birkaç bina enerji sistemi için tasarım spesifikasyonlarını, parametrik analizleri ve optimizasyon simülasyonlarını gerçekleştirmek için kullanılan diğer birçok BEM aracının çekirdeğidir. Yaygın olarak kullanılan BEM simülasyon motorlarından bazıları şunlardır: EnergyPlus, DOE-2, TRNSYS, DeST, ESP-r, IESVE, Trane Trace 700 ve Modelica.

3.4.2. Grafiksel kullanıcı arayüzleri

Grafiksel Kullanıcı Arayüzleri (GUI), insan-bilgisayar etkileşiminde önemli bir ilerlemeyi temsil etmekte olup, bilgisayar kullanımını komut satırı tabanlı arayüzlerden görsel olarak sezgisel ve etkileşimli ortamlara taşımıştır. Bu dönüşüm, kullanıcı erişilebilirliğini önemli ölçüde artırmış ve etkileşim sürecini sadeleştirerek karmaşık hesaplama görevlerini daha

geniş bir kullanıcı kitlesi için daha yönetilebilir hâle getirmiştir (Cardinali, 1994). Grafiksel arayüzler, bilim insanları ve mühendislerin bilgisayar kaynaklarını daha etkin biçimde kullanmalarını mümkün kılan ek işlevler sunmakta; böylece simülasyonların kullanım alanını genişleterek onların değerini artırmaktadır (Fife ve Henry, 1995). Bu paradigma değişimi, özellikle eğitim ortamlarında belirgin şekilde gözlemlenmektedir. Grafiksel arayüzler, esnek veri girişi ve son işlem (post-processing) olanakları sunarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve elektrik mühendisliği gibi karmaşık konuların daha anlaşılır ve ilgi çekici bir biçimde aktarılmasına olanak tanımaktadır (Depcik ve Assanis, 2005).

Bu araçlar, Kategori 1'de listelenenler gibi bir veya daha fazla harici simülasyon motorunun doğrudan kullanımına izin veren kullanıcı dostu arayüzlerden oluşur. Araçlar, HVAC ekipmanının boyutlandırılması dahil olmak üzere tüm bina enerji simülasyonunun bir veya birkaç uygulaması için geliştirilmiştir; tasarım odaklı optimizasyon için kod uyumluluğu ve parametrik analiz sunar. Bu grafiksel kullanıcı arayüzleri (GUI'ler), kullanıcının metin editörleri yerine yazılım kullanarak birincil simülasyon motorlarında gezinmesine olanak tanıdığından, bu araçlar genellikle endüstri uygulamalarında daha fazla tanınır. Bu kategorideki en popüler araçlardan bazıları şunlardır: Trane Trace 3D Plus, IDA ICE, Design Builder, OpenStudio PAT, jEPlus/jEPlus + EA, GenOpt ve BEOpt.

3.4.3. Simülasyon ortamları

Bu araçlar, BEMS simülasyon motorlarının yanı sıra giriş/çıkış BEMS veri dosyalarının dışa ve içe aktarılması gibi diğer eklentilere, programlara ve özelliklere erişmek için arayüzler ve platformlar sağlar. Simülasyon ortamları, gelişmiş tasarım, kontrol odaklı optimizasyon ve parametrik analiz gerçekleştirmek için kullanılır. Bu kategori, hem bağımsız yazılım araçlarını hem de BEMS simülasyon motorlarıyla entegrasyon için geliştirilmiş açık kaynaklı komut dosyası tabanlı çerçeveleri içerir. Bu araçlardan bazıları şunlardır:

- EplusR. R w/Tidydata'dan EnergyPlus'a
- Ladybug ve Honeybee w/Grasshopper to Rhinoceros
- eppy, CVXPy, SciPy, Numpy Python paketleri
- Matlab/Simulink w/MLE+
- EpX
- EnergyPlus'ın ortaya çıkması (SOEP veya Spawn)

- Bina Kontrolü Sanal Test Yatağı (BCVTB)
- OpenBuild
- Simscape Kitaplığı
- Bina Direnci-Kapasitans Modelleme (BRCM) Araç Kutusu
- BLDG
- MPC için Modelleme Ortamı (ME)
- MPCPy

Çizelge 3.5. Literatürde araştırmacılar tarafından kullanılan uygulamalar

Kaynak	Yıl	BIM	BEM	Algorithm	BIM file
(Bazjanac, 2008)	2008	IFC- compliant BIM tool	EnergyPlus	-	IFC
(Azhar, Brown ve Sattineni, 2010)	2010	BIM based IES-VE	IES-VE	-	-
(Moon, Choi, Kim ve Ryu, 2011)	2011	Revit (ARCHITECTURE) Revit (MEP)	ENERGYPL (GBS) EQUEST 3.64 (GBS) ECOTECT 2011 IES/VE 6.2	-	gbXML
(Cormier, Robert, Roger, Stephan ve Wurtz, 2011)	2011	eveBIM[1]	TRNSYS ve EnergyPlus	-	IFC
(W. Jeong, Kim, Clayton, Haberl ve Yan, 2013)	2012	Revit	IES <VE> ve EnergyPlus	-	-
(I. Kim, Kim ve Seo, 2012)	2012	BIM based IFC	EnergyPlus	-	IFC
(Rahmani Asl, Zarrinmehr ve Yan, 2013)	2013	Revit API	GBS API	Optimization Algorithms	gbXML
(W. Jeong, 2013)	2013	Revit API	Dymola® Modelica	-	IFC
(Guzmán ve Zhu, 2014)	2014	Revit 2013	eQUEST	-	gbXML
(W. Jeong, 2014)	2014	Revit	ModelicaBEM	LBNL Algorithm[2]	MVD
(W. S. Jeong, 2014)	2014	Revit	ModelicaBEM	-	MVD
(Asl, Bergin, Menter ve Yan, 2014)	2014	Revit API ve Dinamo	GBS	MOO (Pareto)	gbXML
(Prada-Hernández, Rojas-Quintero, Vallejo-Borda ve Ponz-Tienda, 2015)	2015	Revit	IESVE ve eQuest	-	IFC
(Asl, 2015)	2015	Rhinoceros (Rhino)	DAYSIM ve EnergyPlus	-	-

[1] existing IFC viewing software tool
[2] Algorithm provided by LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) Modelica Buildings library

Çizelge 3.5. (devam) Literatürde araştırmacılar tarafından kullanılan uygulamalar

Kaynak	Yıl	BIM	BEM	Algorithm	BIM file
(Senave, Boeykens ve Operations, 2015)	2015	ArchiCAD ve Revit	EPB ve SBT[1]	-	IFC
(Savaşkan, 2015)	2015	Revit	GBS	-	gbXML
(Remmen, 2015)	2015	BIM-based CAD	(IEA) Annex 60	-	IFC
(W. Jeong ve Son, 2016)	2015	Revit API	Modelica	-	MVD
(Rahmani Asl, 2015)	2015	Revit	DOE ve GBS	MOO Algorithms[2]	gbXML
(W. Jeong ve Son, 2016)	2016	Revit and ArchiCAD	ModelicaBEM	Algorithm Development	-
(Y Lim, Sediadi, Shahsavari, Noor ve Azli, 2016)	2016	Revit	-	BIM- GBI	-
(Santiago, 2016)	2016	Archicad	Ecodesigner	-	-
(S. V. Pinheiro, 2016)	2016	IFC- compliant BIM tool	Modelica	-	IDM / MVD
(W. Jeong, Kim, Clayton, Haberl ve Yan, 2016)	2016	Revit API	ModelicaBEM BESTEST Case 600	LBNL Algorithm	-
(Andriamamonjy, 2018)	2018	IFC- compliant BIM tool	Modelica	-	Ifc2Modelica
(Fernald, Hong, Bucking ve O'Brien, 2018)	2018	Revit	OpenStudio Virtual Environment (VE) Insight360	-	IFC gbXML
(E. Kamel ve A. M. J. E. Memari, 2018)	2018	Revit	EnergyPlus	-	gbXML
Issa (Issa, 2018)	2018	Revit	eQuest	-	gbXML
(S. Pinheiro, 2018)	2018	IFC- compliant BIM tool	EnergyPlus	-	IDM / MVD
(Akbarieh, 2018)	2018	Revit	IDA-ICE	-	IFC
(Gao, Zhang, 2019)	2019	Revit API ve Dinamo	-	-	-
(Spiridigliozzi, 2019)	2019	Revit	IDA-ICE	-	IFC
(Farid Mohajer ve Aksamija, 2019)	2019	Revit	GBS ve Sefaira	-	gbXML
(Sultanguzin, 2019)	2019	Archicad	ANSYS Fluent	-	-
(Ramaji, 2020)	2020	Revit	OpenStudio	MTA[3]	IFC

[1] Space Boundary Tool (SBT), developed by LBNL
[2] multi-objective optimization (MOO) algorithms
[3] Model Transformation Algorithm

3.5. BIM-BEM Süreci için Bilgi Gereksinimi

Proje hedefleri doğrultusunda gerekli bilgiler tanımlanarak, dijital ortamda bir sanal model oluşturulmaktadır. Bina Bilgi Modellemesi (BIM) aracılığıyla oluşturulan bu model, Bina Enerji Modellemesi (BEM) için gerekli olan bilgilerin büyük bir kısmını bünyesinde barındırmaktadır (Choi, 2016). Mimari BIM modeli; bina geometrisi, yapı kabuğu, hacimsel boşluklar, malzeme özellikleri ve inşaat türleri gibi temel verileri içermektedir. Söz konusu model, enerji simülasyon araçlarına veri aktarımı sırasında veri dönüştürücüler aracılığıyla iki farklı görünüm biçiminde iletilebilmektedir: koordinasyon görünümü ve alan sınırı görünümü (Farzaneh, 2019).

Isıtma, soğutma ve havalandırma (HVAC) gibi mekanik bilgiler BIM modelinde tanımlanabilir. Bununla birlikte, bu tür bilgilerin BIM'den BEM araçlarına mevcut veri değiştiricileri kullanılarak aktarılması, bazı birlikte çalışabilirlik sorunları ile karşı karşıya kalmaktadır ve genellikle imkansızdır (O'Sullivan ve Keane, 2005).

BIM modelinde ilgili bilgi gereksiniminin doğru bir şekilde tanımlanması, BEM için çok önemlidir, çünkü gerçek veri alışverişi yalnızca doğru veri tanımları yoluyla elde edilir (Latiffi, Brahim, Mohd ve Fathi, 2015). BIM-BEM sürecinde, tasarım faaliyetine ve projenin kapsamına bağlı olarak her modelleme adımında bilgi gereksiniminin kategorilerinin, türlerinin, aralıklarının ve birimlerinin ne olduğunu anlamak önemlidir (Fox ve Hietanen, 2007).

Şu anda, tasarım uzmanları arasında kusursuz bir BIM modeli elde etme ve bu model üzerinde çalışmaya devam etme konusunda bir güven eksikliği bulunmaktadır. Tasarım profesyonelleri, tutarsız, eksik ve net olmayan veri kaynakları ile BIM-BEM adımları aracılığıyla uygulanan bilgiler konusunda kafa karışıklığı yaşamaktadır. Genellikle, bir bilgi protokolünün olmaması nedeniyle, her modelleme adımında doğru bilgi gereksinimi kullanılarak bir BIM modeli oluşturulmamaktadır. Ayrıca, BIM modeli tasarım sürecinde uygun olmayan bir düzeyde aktarılır ve paylaşılır (Wu ve Issa, 2015).

Bu nedenle, sonraki modellemenin BIM modelini gözden geçirmesi, sınırları ayarlaması ve yinelemeli bir süreçte bilgileri yeniden tanımlaması gerekmektedir. Proje ilerledikçe,

projenin farklı aşamalarıyla birlikte değişen modelleme seviyesindeki değişiklikler, BIM-BEM'in düzgün bir şekilde yürütülmesinin karmaşıklığına katkıda bulunmaktadır.

Bu bölüm, farklı faz LOD'leri ile enerji simülasyonu süreciyle ilgili nitelikler ve parametreler hakkındaki bilgileri ele almaktadır. Bu önemli bilgi olmadan, okuyucu ve araştırmacının süreci anlaması zor olacaktır ve mevcut araştırmalar gerçekleştirilemez. LOD, BIM tabanlı bir projenin çeşitli modelleme ve paylaşım adımlarında grafiksel ve grafik olmayan bilgilerin derecesini belirler. LOD, bir modelin ilerlemesini izlemek için tasarım sürecinin çeşitli noktalarında sağlanması gereken bilgileri ve ayrıntıları tanımlar. İçe aktarılan modeldeki belirli bilgilere güvenmeye izin vererek iletişim ve yürütmede tutarlılık sağlar.

Çizelge 3.6. LOD tasarım evrelerinde gereken parametreler

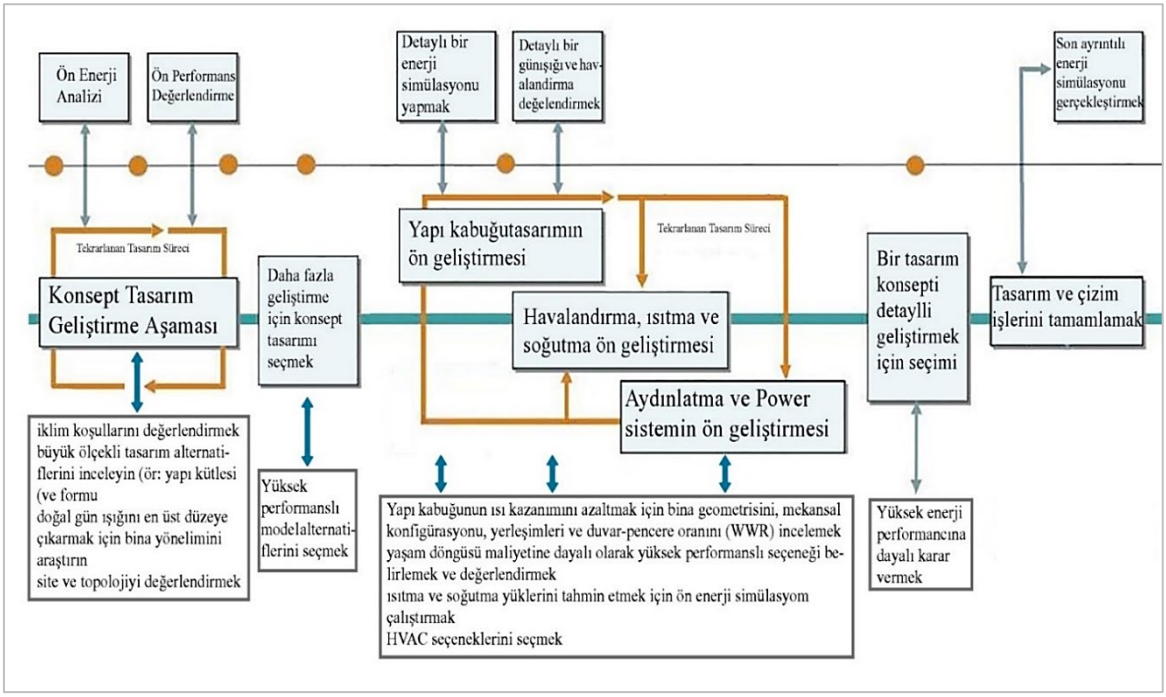
	LOD 100	LOD200	LOD 300	LOD 400
PARAMETRELER	1. Kütle çizimi 2. Bina oryantasyonu 3. Kat seviyeleri, alanlar ve hacimler 4.Genel alanlar ve U değeri	1. Dış duvarlar (özellikler) 2. Döşeme plakaları 3. Duvar ve döşeme plakalarının geometrik değerleri (Alanlar, hacimler) 4. İnşaat malzemesi 5. Analitik özellikler: U değerleri, Isı kütlesi, Yoğunluk.	1. Dış duvarlar 2. İç duvarlar 3. Döşeme plakaları 4. Pencereler ve diğer açıklıklar 5. Duvarların, döşeme plakalarının ve pencerelerin geometrik değerleri (Alanlar, hacimler) 6. İnşaat malzemesi 7. Tavan özellikleri 8. Analitik özellikler: U-değerleri, Isı Kapasitesi, G-değerleri, R-değerleri, Yoğunluk 9. Bina gövdesinde yön/konum	1. Dış duvar 2. İç duvarlar 3. Döşeme plakaları 4. Pencereler ve diğer açıklıklar 5. Duvarların, döşeme plakalarının ve pencerelerin geometrik değerleri (Alanlar, hacimler) 6. İnşaat malzemesi 7. Tavan özellikleri 8. Duvar yalıtım özellikleri 9. Analitik özellikler: U-değerleri, Isı Kapasitesi, G-değerleri, R-değerleri, Yoğunluk 10. Bina gövdesinde yön/konum

3.6. Tasarım Sürecinde BIM-BEM Uygulaması İçin Mevcut sınırlamalar

Şu anda, tasarım sürecinde veri dışa aktarımını benimseme açısından BIM-BEM'i yürütmek için önemli sınırlamalar ve zorluklar mevcuttur. Bir BIM modelinin BEM araçlarına entegrasyonu ve uyarlanması, birlikte çalışabilirlik eksikliği ve verimsiz süreçler nedeniyle hala kusurludur. Ana sorunlar, birlikte çalışabilirlik ve model entegrasyonu sorunları ile

tasarım sürecinde profesyoneller tarafından uygulamada yaşanan zorluklara yol açan teknik ve süreç yaklaşımları arasındaki tutarsızlıklarla ilgilidir.

Son yıllarda literatürde önerilen süreçler, erken tasarım aşamalarını (konsept tasarım ve gelişmiş tasarım aşamaları) kapsamamaktadır. Ayrıca veri gereksinimindeki belirsizlik ve veri kaybı gibi sorunlarla karşılaşılmaktadır. Bu sorunları azaltmak amacıyla, yüksek enerji performanslı BIM tabanlı BEM tasarım süreci önerilmektedir.



Şekil 3.19. Erken tasarım süreci

3.7. Erken Tasarım Aşamasında BIM Tabanlı BEM Sürecin Problemleri

Binanın yaşam döngüsünde sıklıkla sorunlar meydana gelir; örneğin, tekrarlı ve hataya açık veri çoğaltma veya dönüştürme (Bazjanac, 2001) veri "sızıntıları," yedekli veri işleme ve depolama. Bu kusurlar verimlilik kayıplarından paydaşların iletişim bozukluklarına ve binadaki gerçek kusurlara kadar değişen istenmeyen etkilere sahiptir (Cormier, Robert, Roger, Stephan ve Wurtz, 2011).

Yapılan araştırmada, kaynakların çoğunda BIM tabanlı BEM'in sorunları ve zorlukları tartışılmaktadır. Örneğin, Smith ve Tardif, BIM değişiminde yönetim, özgünlük, gerekli kalite, detay, güvenilirlik, şeffaflık ve bilginin erişilebilirliği gibi genel zorlukları gözden

geçirmiştir. Farklı paydaşların görüşlerini tatmin etmek ve farklı araçlar arasında birlikte çalışabilirlik sağlamak, diğer çalışmalarda ve bu kitapta tartışılan BIM değişim zorluklarından ikisidir (Smith ve Tardif, 2009). Her ne kadar agcXML veya İnşaat Operasyonları Bina Bilgi Değişimi (COBIE) gibi bina bilgi değişim standartları örnekleri olsa da, bazı araştırmacılar veri değişim süreci için bir standardın yetersizliğine işaret etmektedir (Pinheiro, 2016; Smith ve Tardif, 2009). Prada-Hernández ve diğ. geometri verilerini sırasıyla Revit'ten eQUEST ve IES-VE'ye dönüştürerek inşaat projesinin ayrıntılı tasarım aşamasında BIM ve BEM yazılımı arasındaki birlikte çalışabilirliği incelemişlerdir. Dönüşüm sırasında Revit modelinde birkaç değişiklik yapılması gerektiği bulunmuştur. Sonuçlar, BIM ve BEM yazılımlarının, birçok yazılım geliştirme şirketi tarafından belirtilenlerin aksine, şu anda sorunsuz bir şekilde birlikte çalışamadığını göstermiştir (Prada-Hernández, 2015).

Şekil 3.19'da gösterilen bileşenler ve onların alt kümeleri, birlikte çalışabilirlik ve veri aktarımındaki genel sorunlar olarak kategorize edilebilir. Steel ve diğ. (2012) göre, dosya ile ilgili BIM birlikte çalışabilirlik sorunları üç farklı kategoride incelenebilir: dosya ve sözdizimi düzeyi (syntax level), görselleştirme düzeyi (visualization level) ve anlambilim düzeyi (semantic level). BIM ve enerji simülasyon araçlarının entegrasyonu, birlikte çalışabilirlik sorunlarının bu üç seviyesini de içerebilir.

Örneğin, bir CAD aracında bir duvarın kalınlığını görselleştirmek ve göstermek önemlidir. Ancak, enerji simülasyon aracı, bir duvar bileşeninin termal özelliklerine ihtiyaç duyar ve bu da iki farklı bileşen arasında bir boşluğa neden olabilecek merkez çizgisinin kullanılmasına yol açabilir (Steel, Drogemuller ve Toth, 2012). Kumar tarafından araştırılan bu konu, yapısal hacim ile enerji simülasyonu için analitik hacim ihtiyacı arasındaki farkı açıklamaktadır. Örneğin, IES-VE, enerji simülasyonu ve hava sirkülasyonu hesaplamaları yapmak için binanın iki farklı kabuk yüzeyine ihtiyaç duyar. Hava sirkülasyonu için IES iç hacmi kullanırken, binanın enerji ve termal değerlendirmesi için yapı kabuğu bileşenlerinin merkez düzlemi tarafından sınırlanan analitik hacim gereklidir (Kumar, 2008). BIM şemalarında sağlanan bilgiler oldukça kapsamlı olabilir ve enerji veya yapısal modellemeyi, Şekil 3.19'da 6 adımdan oluşan BIM dosyalarıyla çalışmak için bir zorluk olarak düşünülebilecek bir süreç haline getirebilir.

Şekil 3.19'da BEM bileşeni olarak gösterilen enerji simülasyon araçları, ayrı bir sorun ve yanlışlık kaynağı olabilir. Enerji simülasyon araçları, hesaplama yöntemlerindeki farklılıklar nedeniyle ısıtma ve soğutma yükleri gibi önemli farklı çıktılara yol açabilir (Kim ve Anderson, 2013). Örneğin, Ecotect yıllık en kötü tasarım yükünü kullanırken, IES en kötü aylık tasarım yükünü kullanır (Jalaei ve Jrade, 2014b). Bu farklılıklar, BIM tabanlı BEM sürecinde hatalara neden olabilir.

Enerji simülasyon motorlarının yanı sıra, GUI'nin arkasında çalışan ve içe aktarılan BIM dosyalarının yorumlanmasından sorumlu olan bu tür araçlarda yerleşik kodlar bulunur. Tek bir BIM dosyasındaki bazı öznitelikler, belirli bir enerji simülasyon aracı tarafından desteklenmeyebilir, bu da bir BIM dosyasını içe aktarmayı zorlaştırabilir. Örneğin, malzeme ve pencere türü gibi öznitelikler gbXML biçiminde kullanılabilir; bununla birlikte, malzeme özelliğinden farklı olarak, pencere türü, Revit tarafından dışa aktarılan yapı malzemesini veya mekanik verileri almayan EnergyPlus veya IES-VE ile uyumlu olmayabilir (Hyun, Marjanovic-Halburd ve Raslan, 2015; Moon, 2011).

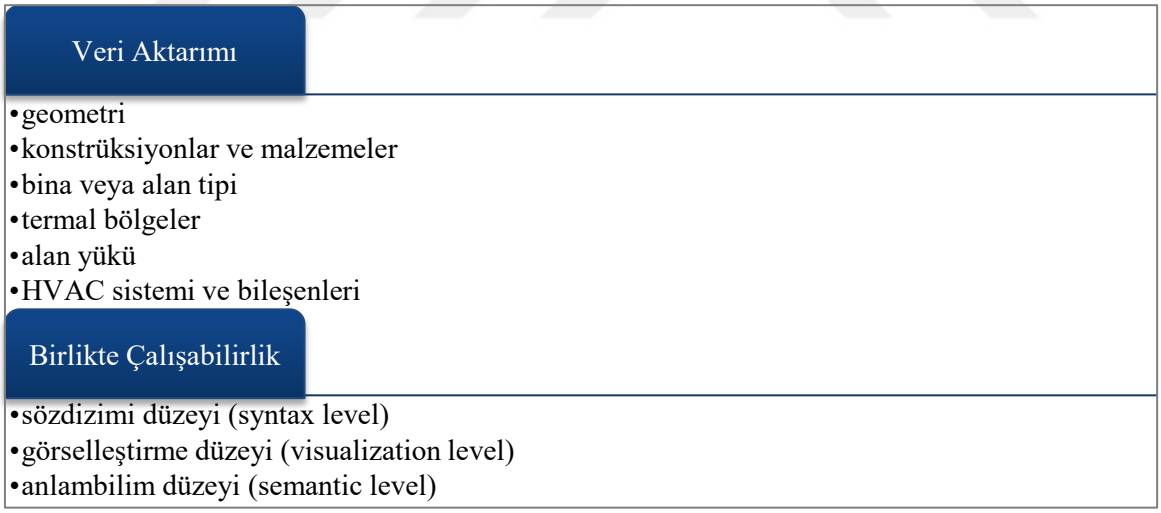
Araçlar arasında bilgi alışverişi yoluyla veri kaybı, en yaygın sorunlardan biridir (Jalaei ve Jrade, 2014a). Bu nedenle, gerekli tüm veriler BIM modeli aracılığıyla enerji simülasyon araçlarına aktarılamaz; eksik veriler manuel olarak eklenmeli veya kullanılan simülasyon araçları tarafından otomatik olarak oluşturulmalıdır. Bunun nedeni, bina bilgilerinin dışa aktarılmasında, BIM araçları da dahil olmak üzere, Şekil 3.19'da gösterilen farklı bileşenlerin etkisi olabilir. Ayrıca veriler BIM dosyasına düzgün bir şekilde aktarılamayabilir. BIM dosyası verileri kaydedemeyebilir veya belirli bir bilgi parçası için herhangi bir öznitelik tanımlayamayabilir. Aynı sorun, BEM aracı içindeki verileri eşlerken de ortaya çıkabilir. Bu nedenle, BIM tabanlı BEM sürecindeki hemen hemen tüm bileşenler veri kaybına neden olabilir. Kim ve Anderson'un IFC gibi BIM dosyaları ile DOE2 gibi enerji simülasyon araçları arasındaki birlikte çalışabilirlik üzerine yaptıkları bazı çalışmalar, çalışma süresi ve inşaat programı hakkında olası bilgi eksikliklerini göstermektedir (Kim ve Anderson, 2013). Gerekli verilerin eksikliği veri kaybına benzer bir başka zorluktur; ancak, gerekli tüm veriler ilk BIM aracı tarafından tanımlanıp sağlandığı sürece işlenmesi daha kolaydır (Kamel ve Memari, 2019).

BIM kullanarak enerji simülasyonu gerçekleştirdikten sonra bile, üretilen verileri BIM dosyasında saklamak, yeni bir simülasyon (örneğin, enerji simülasyonu) yaptıktan sonra

güncellemek ve çıktıları görselleştirmek gibi konularda zorluklar devam etmektedir. Sanguinetti ve arkadaşları, IFC ve IDF dosyalarını kullanarak bir vaka çalışması gerçekleştirmiş ve burada enerji performans çıktıları, yapı kabuğu bileşenlerinin ayrıntılı termal akışlarını sağlayan Revit'te otomatik termal bölge üretimi kullanılarak görselleştirilmiştir (Sanguinetti ve Eastman, 2015). İlk tasarım aşamalarında enerji simülasyonu için veri eksikliği ve performansın ölçülmesi ile geri bildirim sağlanması gibi zorluklar belirlenmiştir (Kamel ve Memari, 2019).

Belirlenen zorlukların ve sorunların çoğunun, birlikte çalışabilirlik ve veri aktarım sorunları altında kategorize edilebilen tasarım sürecinde ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Bu tür zorluklara örnek olarak aşağıdakiler not edilebilir:

- BIM aracı bir modeldeki tüm bilgileri aktaramayabilir,
- BIM dosyası tüm bilgileri düzgün kaydedemeyebilir,
- BEM aracı tüm bilgileri okuyamayabilir ve bilgiler eşlenmeyebilir,
- BEM ve enerji simülasyon motorunun dosya biçimine düzgün şekilde aktarılamayabilir.



Şekil 3.20. BIM tabanlı BEM sürecin sorunları

Tasarım süreci, bir proje içindeki tasarımın teknik ve teknik olmayan işlevlerinin koordinasyonunu içerir. Bina enerji simülasyonu, proje hedeflerine en uygun olanı seçmek için tasarım çözümlerinin performansını karşılaştırmaya izin veren bu sürecin önemli parçalarından biridir (Tuomas Laine, 2012). Optimal bir çözüme ulaşmak için, projenin ilk aşamalarından itibaren mimarlar ve mühendisler arasındaki işbirliği büyük bir önem taşır.

Tasarım süreci geleneksel olarak bina geometrisinin tasarımını mevcut binaların kalitatif tasarımına ve önceki deneyimlere dayalı olarak gerçekleştiren mimarla başlar. Daha sonra mühendisler, doğrulama için ayrıntılı tasarım aşamasında genellikle simülasyonlar gerçekleştirir. Bina sürecinin ilk aşamalarında, binanın enerji verimliliğine karar vermede büyük etkisi olan binanın genel formu, yerleşim planı, yönelimi ve yapım yöntemi ile ilgili önemli kararlar alınır. Erken kararlar, tasarım alternatifinin kullanışlılığını, üretkenliğini ve esnekliğini etkiler. Pasif tasarım kararları, aktif tasarım stratejilerine büyük ölçüde aşırı talepler getirebileceğinden, aktif ve pasif tasarım stratejilerini entegre etmek çok önemlidir.

Geleneksel bir tasarım sürecinde, model sapması riskleri yüksektir ve bu da erken aşamalarda çeşitli hata ve yanlış anlamalara yol açabilir. Ek olarak, enerji kullanımını etkileyen kararların ve analizlerin çoğu (örneğin, günışığı analizi gibi) erken tasarım aşamalarında dikkate alınmamaktadır (Eastman, 2011). Bina tasarım performansının geç analizi verimli bir tasarım süreci olmayan tüm çizimlerde birkaç değişiklik ve yeniden çalışma gerektirir.

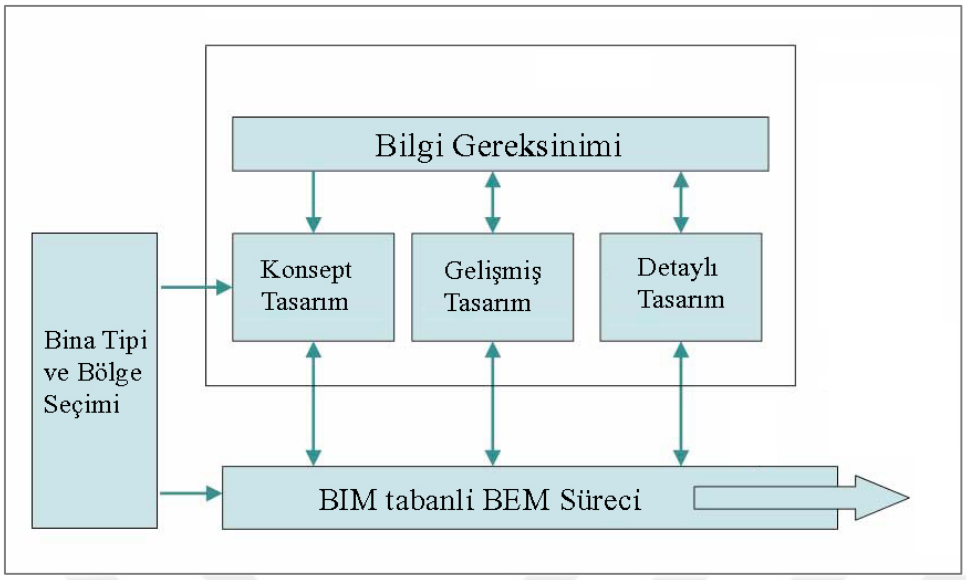
Bunun aksine, BIM tabanlı bir tasarım süreci daha entegre olmalıdır; bunun için birden çok disiplin ve tasarım öğesi, çeşitli sistemler ve bileşenler arasında bir sinerji oluşturmak amacıyla işbirliğine dayalı bir ortamda çalışabilir (Todd ve Hayter, 2003). Bu bağlamda, BIM tabanlı BEM süreci projenin en erken aşamalarında başlamalıdır; bu süreçte mimarlar ve mühendisler, projede daha önce varsayımlar yerine doğru verilere dayanarak tasarım kararları verebilirler. Bilgi paylaşımı, işbirliği ve erken karar verme, binanın kaynak tüketimini, çevresel etkisini ve tasarım çatışmalarını azaltma açısından bina performansı üzerinde en fazla etkiye sahiptir (Azari ve Kim, 2016).

Çizelge 3.7'de grafik model, BIM veya BEM araçlarında 2B veya 3B formatlarda görsel olarak sunulan bilgiler kullanılarak oluşturulan modeli ifade eder. Sanal bir bina modelindeki öğeler arasındaki ilişkileri kurarak görsel bir referans, konum ve bağlam sağlar. Grafiksel bir model oluşturmak için fiziksel boyut veya boyut bilgisi gereklidir. Grafik olmayan model ise, BIM veya BEM araçlarında elemanlar veya elemanların özellikleri için genellikle metin formatında sunulan bilgiler tarafından oluşturulan modeli ifade eder; bunlara bileşen özellikleri, termal özellikler vb. dahildir.

Çizelge 3.7. Tasarım aşamasında farklı LODES tanımları

LOD	Tanım	Tasarım aşaması
100	Makro düzeyde yaklaşık yapı elemanlarını kapsayan grafik model: alan, kütle ve biçim.	Ön konsept tasarımı: Hedef, erken ve geniş alan tasarımı, iklim koşulları, bina yönelimi ve tasarım alternatiflerinin büyük ölçekli etkilerinin değerlendirilerek bina tasarımı ve günışığı hakkında erken geri bildirim sağlanmasıdır.
150	Genel proje özelliklerini, iklim ve konum özelliklerini kapsayan grafik olmayan model.	
200	Orta düzeyde yaklaşık yapı elemanlarını kapsayan grafik model (mikro ve makro düzeyler arasında kalan bir nüfus büyüklüğünü gösterir): geometri, mekansal, boyut, yerleşim ve yönelim.	Nihai konsept tasarımı: Hedef, yüksek performans seçeneklerini, bina geometrisini tanımlamak, mekansal konfigürasyonu, yerleşimleri, pencere-duvar oranını ve güneş radyasyonunu değerlendirmek için boşluk-mekân tasarımıdır. Bina yüklerini ve enerji tüketimini tahmin etmek için ön simülasyon tamamlandı.
250	Boşlukları, termal bölgeleri ve ön HVAC sistemlerini kapsayan grafiksel ve grafiksel olmayan model.	
300	Doğru yapı elemanlarını ve ayrıntılı geometri, mekansal, açıklıklar, miktar, düzen, konum ve yönelim bilgilerini kapsayan mikro düzeyde grafiksel model.	Ayrıntılı tasarım: Hedef, tahminler yapmak ve doğru enerji sağlamak için nihai teknik sistem kararları ve enerji maliyeti tahmini için içeriden dışarıya ve yukarıdan aşağıya ayrıntılı bir uzay-uzay tasarımıdır.
	Yapı elemanlarının, yapı ve malzeme türlerinin, iç yüklerin, ayrıntılı HVAC sistemlerinin doğru ve ayrıntılı termal özelliklerini kapsayan grafiksel ve grafiksel olmayan bilgiler.	

Bununla birlikte, BIM tabanlı BEM sürecinin eleştirel düşünme yoluyla doğru bir şekilde takip edilmesi gerekir ve başarılı bir uygulama için tasarım sürecinin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir. Şekil 3.21, farklı tasarım aşamalarında BIM tabanlı BEM yönteminin uygulanmasını göstermektedir. Literatürdeki araştırmalarda, genellikle ileri aşamalarda BIM tabanlı BEM sürecinin değerlendirilmesine odaklanılmakta, erken aşamalarda ise bu sürecin kullanılmasına çok az ilgi gösterilmektedir. Bu nedenle, bu alanın daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyduğu belirtilmektedir.



Şekil 3.21. Farklı tasarım aşamaları

BIM tabanlı BEM metodolojisi literatürde yaygın olmasına rağmen, çok az uygulama bu kavramları inşaat sektöründeki bina tasarım kararları için bir karar destek çerçevesine entegre etmektedir. Binalar için uygun yapı kütlesi, form, yerleşimler, WWR (pencere alan oranı) ve … seçmek amacıyla, Bina Bilgi Modellemesi (BIM) tabanlı Bina Enerji Modelleme (BEM) süreci ile karar verme yöntemlerinin entegrasyonunu içeren inşaat profesyonelleri ve tasarımcılar için bir çerçeve önerilmelidir. Bu çerçevede, özellikle de ilk adımlarda mimarlar tarafından verilen kararları kolaylıkla ve hızlı bir şekilde yüksek enerji performanslı tasarım hedeflerine ulaşmak amacıyla desteklemek önemlidir.

3.8. Bina Bilgi Modellemesi Tabanlı Bina Enerji Modellemesi Sürecinin Çözüm Önerileri

BIM dosyaları ile enerji simülasyon araçları arasındaki veri alışverişi ile ilgili sorunların riskini azaltmak için bazı çalışmalar, geleneksel yöntemler yerine BIM uygulama programı arabirimi (API[1]) kullanımını önermektedir. API kullanarak, Revit, ArchiCAD veya Bentley gibi doğrudan BIM araçlarından bağımsız bir BIM dosyası geliştirmek mümkün olmaktadır (Jeong, 2014; Kim, 2015).

Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, BIM tabanlı BEM sürecinin sorunlarını çözmek amacıyla, BIM ve BEM araçları arasında ara katman yazılımı geliştirilmesi, manuel

[1] Application Program Interface

olarak eksik veri eklenmesi, modeli genişletme ve BIM şemasının semantik olarak zenginleştirilmesi gibi çözümler önerilmiştir. Bu bölümde, BIM tabanlı BEM sürecinin sorunları, IFC tabanlı çözümler, gbXML tabanlı çözümler ve BIM tabanlı Modelica BEM olarak üç gruba ayrılarak, araştırmacılar tarafından nasıl yorumlandığı açıklanacaktır.

3.8.1. IFC tabanlı çözümler

BIM aracı ile BIM dosyası arasında çalışan bir ara katman yazılımı geliştirmek, birlikte çalışabilirlik sorunlarını giderebilmek için bir çözümdür. Farklı CAD araçları ile Revit ve OpenStudio gibi enerji simülasyon araçlarının birlikte çalışabilirliğine yönelik çabalar devam etmektedir. Sürecin mevcut sorunlarının üstesinden gelmek için, Revit'ten IFC dosyasını okumak verileri almak ve gerekli bilgileri çıkarmak amacıyla BIMserver ve Query Generator kullanılarak bir ara katman yazılımı geliştirilmiştir. Temel amaç, binanın geometri verileriyle ilgili sorunları çözmek ve OpenStudio'da enerji simülasyonu için düzeltilmiş bir dosya sağlamaktır (Yu, 2014).

Veri eksikliği, bina bilgi modellemesi tabanlı bina enerji modellemesi sürecinin herhangi bir aşamasında ortaya çıkabilir. Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı (LBNL) tarafından önerilen yarı otomatik bir enerji modelleme süreci, EnergyPlus için uygun bir çıktı geliştirmek üzere BIM IFC şemasını benimsemenin bir örneğidir. Ancak, manuel olarak veya başka araçlar kullanılarak eklenmesi gereken HVAC ile ilgili veriler gibi gerekli tüm bilgileri içermediğinden tam otomatik değildir. ArchiCAD, IFC dosyasını geliştirmek için kullanılır. EnergyPlus için IDF dosyası, sadece ön inceleme için DXF formatına dönüştürülür ve daha sonra bina enerji modellemesi, mekanik sistemler ve çizelgeler gibi diğer alanlarla ilgili gerekli verileri sağlamak için BIM gibi araçlardan elde edilen modele dayanarak gerçekleştirilir (Bazjanac, 2008; O'Donnell, 2013). Bir BIM modelinde eksik HVAC sistem verileri ile ilgili sorunu çözmek için başka çözümler benimsenmiştir. Örneğin, El Asmi ve arkadaşları, Fransız Bilim ve Teknik Bina Merkezi tarafından geliştirilen bir araç olan IFC BIM modeli ile COMETH simülasyon motoru arasında bir ara katman geliştirmiştir. El Asmi ve diğ. IFC modelinden gerekli verileri çıkarmak için Model Görünümü Tanımı (MVD)[1] yaklaşımını kullanmış; daha sonra HVAC sistemiyle ilgili eksik verileri sağlamak için IFC modelinin önceden oluşturulmuş genişletme kabiliyeti olan IfcPropertySet'i kullanmışlardır (El Asmi, 2015). BIM-BEM birlikte çalışabilirlik

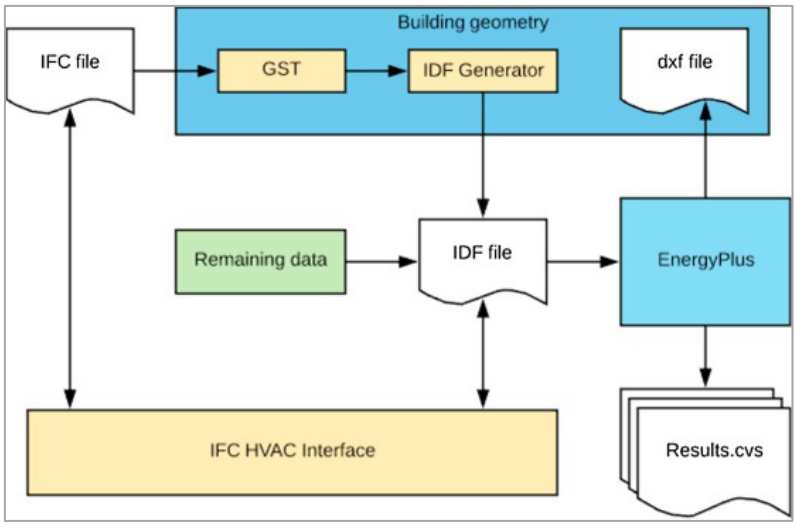
[1] Model View Definition

sürecindeki farklı araçlar, karşılık gelen eksik bilgi parçasına göre uygun hata mesajları geliştirebilir; ancak tüm simülasyon araçlarında durum böyle değildir ve uygun uyarılar ile hata mesajları geliştirilemeyebilir (El Asmi, 2015).

Geçtiğimiz birkaç yıl boyunca, araştırmacıların çoğu geometrinin BIM'den BEM'e aktarıldığı ilk aşamada veri kaybı ve birlikte çalışabilirliğine odaklandı. Çeşitli araştırma grupları, bina geometrisini IFC uyumlu bir BIM yazılımından EnergyPlus'a aktarmak için farklı türde dönüştürme araçları ve yöntemleri geliştirdi. Başka bir deyişle, bu işlem IFC formatını, EnergyPlus için girdi dosyası formatı olarak kullanılan Giriş Veri Formatı'na (IDF)[1] dönüştürür (Ahn, 2014; Maile, 2007; O'Donnell, 2012; See, 2011).

Graphisoft ve Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı (LBNL), bir Geometri Sadeleştirme Aracı (GST)[2] geliştirmiştir. Bu araç, BIM aracından alınan IFC dosyasında depolanan bina geometri verilerinden gereksiz verileri kaldırarak, EnergyPlus'ın kurallarıyla uyumlu ASCII formatında veriye otomatik olarak dönüştürmektedir (Bazjanac, 2009). Daha sonra geliştirilen bir IDF Jeneratörü, binanın geometrisini ASCII'den IDF'ye dönüştürür. Bu işlem, Şekil 3.22'de gösterilmektedir. GST ve IDF Jeneratörü yöntemi, Bazjanac ve Kiviniemi (Bazjanac ve Kiviniemi, 2007) Maile ve ark. (Maile, 2007) tarafından ve BIM-BEM araştırmaları için Bazjanac (Bazjanac, 2008), (Bazjanac, 2009) tarafından yapılmıştır. Bu araçlar, daha fazla bina simülasyonu için bir IFC dosyasını başarılı bir şekilde bir IDF dosyasına aktarabilmesine rağmen, IDF dosyasında oluşturulan bina geometrisinin simülasyondan önce daha fazla modifikasyona ihtiyaç duyduğu bulunmuştur (örn. perde duvarındaki pencerelerin konumunu ayarlama, eksik zeminleri düzeltme). Ayrıca Ahn ve ark., binaların termal görünümündeki (iki boyutlu görünüm) geometrik bilgileri temsil eden 2. seviye alan sınırını bir IDF dosyasına depolayan bir IFC dosyasından doğrudan IfcRelSpaceBoundary'yi ayıklayan bir IFC-IDF arayüzü geliştirmiştir. Bu yöntem, düzensiz bina geometrisi için uygun değildir (Ahn, 2014). IFC ve IDF arasındaki arayüz için benzer yöntemler, IFCtoIDF yardımcı programı (BSPro COMServer için çalışan) gibi diğer araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir; Space Boundary Tool (SBT-1) (See, 2011); ve SimModel (O'Donnell, 2012).

[1] Input Data Format
[2] Geometry Simplification Tool



Şekil 3.22. GST ve IDF generator çalışma süreci (Maile, 2007)

Ahn ve ark., çalışmalarında CAD araçlarından (örneğin IFC) EnergyPlus giriş dosyası IDF'ye bilgi geçişini sağlayan iki yaklaşım önermektedir: Tam Otomatik Arayüz (FAI)[1] ve Yarı Otomatik Arayüz (SAI)[2]. FAI, ideal olarak geliştirilirse, insan müdahalesi gerektirmeden önceden tanımlanmış varsayılanların kullanımına dayalı olarak IFC'yi IDF'ye dönüştürebilir. Buna karşılık SAI, IFC'den alınan geometri bilgilerini IDF'ye dönüştürür ve ardından belirsiz simülasyon girdileri için insan verilerinin girilmesini gerektirir. Hem FAI hem de SAI, IFC'den alınan geometrik bilgilerden ve termal özelliklerden en iyi şekilde yararlanır; bu da EnergyPlus'ta geometrik bir modelin yapılandırılmasında önemli ölçüde zaman ve çaba tasarrufu sağlar. SAI, kullanıcının daha doğru girdi değişkenleri girmesine ve gerekirse yenilikçi enerji tasarrufu sistemlerinin kontrol mantığını özelleştirmesine izin verdiği için, FAI'den daha güvenilir, şeffaf ve kalite garantilidir (Ahn, 2014).

Bazı araştırmacılar, BIM tabanlı BEM geometri aktarımını elde etmek için Common Boundary Intersection Projection (CBIP) algoritmalarını uyguladılar. Giannakis ve ark., bir CBIP algoritmasına dayanan bir IFC BIM modelinden EnergyPlus ve TRNSYS için geometri girdisini yarı otomatik olarak oluşturmak için bir metodoloji geliştirdiler. İşlem esas olarak üç adımdan oluşur: İlk adım, bina modelinden gerekli bilgileri belirlemektir; ikinci adım, CBIP algoritması yoluyla ikinci seviye sınırını tanımlamaktır; son adım ise, CBIP algoritması tarafından belirlenen IFC'nin geometri bilgilerini bir EnergyPlus veya

[1] Full-automated Interface
[2] Semi-automated Interface

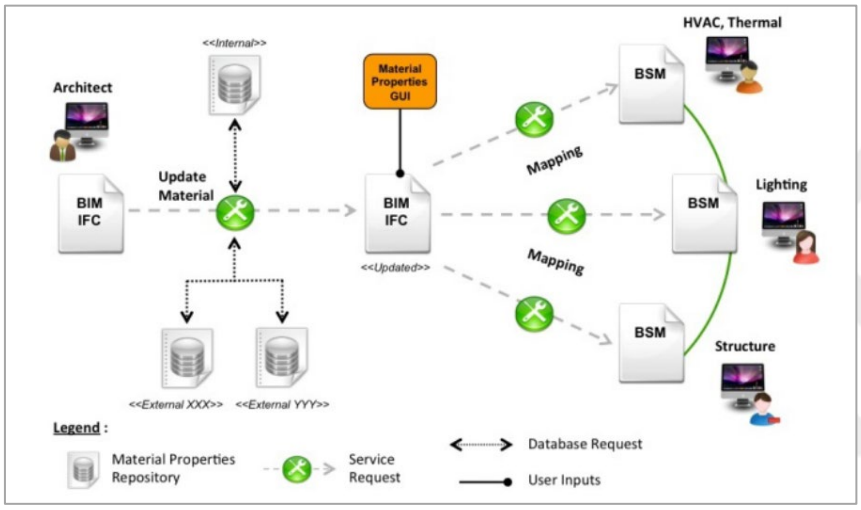
TRNSYS giriş dosyasına dönüştürmektir (Giannakis, 2015). Lilis ve ark., IFC dosyalarından yapıyı temsil eden geometrinin ikinci seviye mekan sınırını oluşturmak için CBIP algoritmasını uyguladılar. Bu yöntem, son derece karmaşık bina geometrisini kullanabilme kabiliyeti nedeniyle BIM tabanlı BEM'nin geliştirilmesini teşvik eder. Test sonuçları, önerilen yaklaşımın simülasyon modeli için dahili ve harici termal, gölgeleme ve hava elemanları gibi olası eleman türlerinin çoğunu üretebileceğini göstermiştir (Lilis, 2017).

BIMserver, Beetz ve ark. tarafından sunulan açık kaynaklı bir IFC modelidir. Bir grup araştırmacı, BIMserver'ı IFC dosyasında depolanan bina geometrisini almak ve bina performans simülasyon araçları (örneğin EnergyPlus ve Radiance) tarafından dolaylı olarak kullanılabilen OpenStudio modeline aktarmak için veri arayüzü olarak kullanmıştır (Beetz, van Berlo, de Laat ve van den Helm, 2010). Ramaji ve ark. tarafından tanımlanan iş akışında, model dönüşümü açık kaynak BIMserver kullanılarak geliştirilmiş bir serileştirici tarafından gerçekleştirilirken, OpenStudio uzantısı modelleri OpenStudio ve BIMserver arasında geçiş yapar. Dönüşüm algoritması ve BIMserver'deki uygulaması, bir binanın gerçek enerji talepleri ile geliştirilen iş akışı yoluyla yaratılan bir simülasyon modelinin tahmini enerji taleplerinin karşılaştırılmasıyla bir alan çalışmasında doğrulanmıştır (Ramaji, 2020). BIMserver, Yu ve ark. (Yu, 2013), Yu (Yu, 2014) ve Jiang ve diğ. (Jiang, 2015) tarafından araştırılmıştır.

Daha çok veri dönüşümüne odaklanan önceki araştırmacılar dışında, Welle ve ark. multidisipliner tasarım optimizasyon ortamları için otomatik BIM tabanlı multidisipliner bir termal simülasyon uygulayan ThermalOpt adlı bir yöntem geliştirdi. Bu yöntem, IFC veri formatına dayalı bir ara katman yazılımı (IFCThermalSim Plugin) kullanarak görsel programlama tabanlı parametrik BIM'i bina termal (EnergyPlus Wrapper) ve gün ışığı (Radiance Wrapper) simülasyonu ile birleştirdi. Ara katman yazılımının temel rolü, bina geometrisinin mimari görünümünü termal görünüme aktarmaktır. Gerekli diğer bina bilgileri kullanıcı arayüzüne eklenebilir. Gelecekteki çalışmalar için termal analiz yeteneklerini geliştirmek üzere gelişmiş HVAC sisteminin ThermalOpt'a eklenmesi önerilmektedir (Welle, Haymaker ve Rogers, 2011).

Cormier ve diğ. belirli bir disipline ilişkin veri alt kümesini manipüle ederek, çok disiplinli bir çevre için işbirliğine dayalı çalışmaya ulaşmayı amaçlayan BIM tabanlı bir Hizmetler Platformu önerdi. Şu anda bu platform, EnergyPlus ve TRNSYS için IFC tabanlı BIM'den

tam bir BEM modeli elde etmeye odaklanmaktadır. Bu süreç, geometrinin ikinci seviye termal görünüme dönüştürülmesini, IFC tabanlı malzemenin harici veritabanlarındaki termal özelliklerle güncellenmesini, BEM simülasyon yapılandırmasını ve lansmanını ve sonuç analizi çıktısını içermektedir. BIM'in yönüne ve ilgili faydalarına doğru bir girişim olarak, yaşam döngüsü desteği oluşturmak için bir SaaS (Software-as-a-Service) stratejisi uygulayan bir yazılım platformu geliştirilmiştir. Bu platform, özel yazılım arayüzü sayesinde kolayca erişilebilir hale gelmiş ve özellikler internet üzerinden uzaktan kullanılabilir (Cormier, 2011).



Şekil 3.23. Bina simülasyon modeli üzerinde malzeme özellikleri tanımı için hizmetler ve arayüzler (Cormier, 2011)

Kim ve diğ. ArchiCAD ve Revit çalışma ortamında IFC tabanlı bina verilerini dönüştüren bir IFC tabanlı IDF dönüştürücü geliştirmiştir. Bu dönüştürücü, bina yüzeyini, pencere tipi ve malzeme verilerini EnergyPlus'a özgü IDF veri formatına aktarabilmekte ve bina enerji performansını erken tasarım aşamasında analiz edebilmektedir. IDF dönüştürücü, BIM kitaplık verilerini ASHRAE malzeme verilerine çevirebilecek entegre bir kitaplık oluşturmak için her bir malzemeye benzersiz kodlar atayarak malzeme verilerini aktarır. Ayrıca, bu dönüştürücü, kullanıcının EnergyPlus simülasyonu için termal bölgeler, bina konumu, yükler ve çalışma programı gibi belirli bilgileri eklemesine olanak tanır. Ancak, BIM modelleme yönergeleri, alanın imar edilmesi ve entegre malzeme kütüphanesinin sınırlandırılması ile ilgili bazı hususların geçerlilik süresi boyunca ortaya çıktığı belirtilmektedir (Kim, 2012).

Ramaji ve diğ. OpenStudio'da geometri, malzeme, pencere tipi ve termal özellikler verilerinin başarıyla çevrildiği bir IFC dosyasından enerji simülasyon modeli üretim iş akışını göstermiştir (Ramaji, Messner ve Leicht, 2016).

Choi ve diğ. standart BIM tabanlı BEM işlemi, BIM tabanlı BEM için malzeme kütüphanesi ve BIM tabanlı BEM destek sisteminden oluşan bir BIM tabanlı BEM ortamı geliştirmiştir. Standart BIM tabanlı BEM süreci, çoklu katılımcılar için uygun BIM tabanlı BEM'in yüksek kaliteli çalışmasına olanak tanır. Malzeme kütüphanesi, 2013 ASHRAE El Kitabı'na dayanarak EnergyPlus için BIM nesnelerinin doğru yapı verilerini oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. BIM tabanlı BEM destek sisteminin ana rolleri arasında bina işletim programının atanması, IFC verilerinin IDF verilerine dönüştürülmesi, IDF dosyasına malzeme verilerinin eklenmesi ve simülasyonun çalıştırılması yer alır. IFC dosyasındaki bina geometrisi, malzeme bilgileri ve alan türü, önerilen sistemde otomatik olarak EnergyPlus'a dönüştürülebilir (Choi, 2016).

O'Donnell ve ark. tarafından ArchiCAD'e oluşturulan IFC dosyası, Space Boundary Tool (SBT-1) tarafından basitleştirilir ve bir çeşit IDF dosyası haline gelir. ArchiCAD'de kullanılan her malzeme için aynı "dolgu tipi" stiline sahip malzemeler için, tüm ilgili termal özellikleri ve kalınlıkları içeren IDF formatında ek bir malzeme kütüphanesi oluşturulur. Basitleştirilmiş termal bölgeler, BIM modelinden boşluk adına göre dönüştürülür. Bina konumu ve simülasyon kontrol verileri gibi diğer gerekli bilgilerin Grafik Kullanıcı Arayüzüne (GUI) manuel olarak girilmesi gerekir. Bununla birlikte, önerilen yöntemin bir kusuru, BIM modeli üzerindeki hazırlık çalışmasının zaman alıcı olmasıdır (O'Donnell, 2013). Benzer şekilde, Kim ve ark. bina geometrisini, uzamsal ve bölge verilerini IFC dosyası aracılığıyla ArchiCAD'den çıkarmak için bir metodoloji sundular ve bina enerji performansını tahmin etmek için bu verileri DOE-2'nin giriş dosyasına uydurdular (Kim ve Anderson, 2013).

Bazjanac ve Maile, EnergyPlus için IFC tabanlı HVAC ekipman ve sistem tanımlamasının (sadece HVAC bileşenlerini ve sistemlerini doğrudan tanımlayan veriler) IDF formatına dönüştürülmesini sağlayan bir IFC HVAC arayüzü oluşturdu veya bunun tersi de geçerlidir. IFC HVAC arayüzü ve IFCtoIDF yardımcı programı, birlikte çalışarak Şekil 3.23'deki gibi hem bina geometrisini hem de HVAC verilerini IFC dosyasından IDF dosyasına çevirebilir (Bazjanac ve Maile, 2004). Benzer şekilde, O'Sullivan ve Keane, özellikle HVAC için daha

hızlı ve kullanıcı dostu bir enerji simülasyonu süreci uygulamak amacıyla, EnergyPlus'a özgü IDF formatını okuma ve verme yeteneğine sahip bir IFC tabanlı HVAC grafik kullanıcı arayüzü geliştirdi (O'Sullivan ve Keane, 2005).

Çizelge 3.8'de BIM tabanlı BEM sürecinin sorunlarına araştırmacılar tarafından yapılan IFC tabanlı çözümler özetlenmektedir.

Çizelge 3.8. BIM tabanlı BEM sürecinin sorunlarına araştırmacılar tarafından yapılan IFC tabanlı çözümler

Sorunlar		Çözüm	Kaynak
Farklı araçların birlikte çalışılması		GST ve IDF Jeneratörü yöntemi	(Bazjanac ve Kiviniemi, 2007), (Maile, 2007a), (Bazjanac, 2008), (Bazjanac, 2009)
		IFCtoIDF yardımcı program ve arayüz	(Ahn, 2014)
		Space Boundary Tool (SBT-1)	(See, 2011)
		SimModel	(J. O'Donnell, 2012)
Bileşenler arasında veri aktarımı	Geometri	Common Boundary Intersection Projection (CBIP) algoritma	(Giannakis, 2015), (Lilis, 2017)
		BIMserver'ı veri aktarım arayüzü olarak kullanmak	(Beetz, 2010), (N. Yu, 2013), (N. Yu, 2014), (Jiang, 2015)
		otomatik BIM tabanlı multidisipliner bir termal simülasyon uygulayan ThermalOpt adlı arayüz	(Welle, 2011)
	Material	SaaS (Software-as-a-Service) stratejisi uygulayan bir yazılım platformu	(Cormier, 2011)
		IFC tabanlı bir IDF dönüştürücü	(I. Kim, 2012)
		IFC dosyasından enerji simülasyon modeli üretim iş akışını	(Ramaji, 2016)
	Alan tipi	IFC dosyasındaki bina geometrisi, malzeme bilgileri ve alan türü önerilen sistemde otomatik olarak EnergyPlus'a dönüştürülebilir	(Choi, 2016)
	Termal Bölge	Basitleştirilmiş termal bölgeler	(J. T. O'Donnell, 2013), (H. Kim ve Anderson, 2013)
	HVAC	IFC tabanlı bir HVAC grafik kullanıcı arayüzü geliştirilmek	(Bazjanac ve Maile, 2004; O'Sullivan ve Keane, 2005)

3.8.2. gbXML tabanlı çözümler

İnşaat endüstrisi, mimari modelin içeriğini standartlaştırmak için sürekli olarak yeni yöntemler geliştirmektedir. Bu nedenle, mimari verilerin ve enerji verimliliği simülasyonlarının birlikte çalışabilirliğinin sağlanması gerekmektedir. IFC tabanlı yöntemlerin yanı sıra, gbXML tabanlı yöntemler de BIM ile bina enerji simülasyonu arasındaki veri aktarımı ve birlikte çalışabilirlik sorunlarına çözüm sunmaktadır.

Salakij ve ark. Matlab kullanılarak, gbXML BIM dosyasını okuyabilen Building Energy Analysis Model (BEAM) adlı bir enerji simülasyon aracı geliştirilmiştir. BEAM'in, EnergyPlus gibi simülasyon araçlarında kullanılan IDF dosyalarına kıyasla daha az veri kaybına yol açabileceği ifade edilmektedir (Salakij, Yu, Paolucci ve Antsaklis, 2016). Bir binadaki nadir yüzeylerin (örneğin, kavisli yüzeyler) ve bileşenlerin modellenmesi ve bu bilgilerin BIM modeli aracılığıyla aktarılması, BIM'in enerji modellemesinde karşılaşılan bir diğer zorluk olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, bazı araştırmalar, CAD yazılımlarından EnergyPlus'a veri aktarımı için mesh planarizasyon algoritmaları gibi yöntemler kullanan ara katman yazılımlarının kullanılmasını önermektedir (Santos, Schleicher ve Caldas, 2017).

Abanda ve Byers, bina yöneliminin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla Revit ve GBS yazılımlarını kullanmıştır. Revit ve GBS'nin kullanımı, bina geometrisinin BEM araçlarında yeniden oluşturulmasına gerek kalmadan, bina yönelimlerine ilişkin hızlı tasarım seçeneklerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Abanda ve Byers, 2016). Benzer şekilde, Kim ve ark. gbXML veri şemasına dayalı BIM tabanlı GBS simülasyonu kullanarak pencere boyutu, konumu ve yönelimin bina enerji yükü üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. BIM tabanlı GBS simülasyonu, bina modelinin parametrik olarak kontrol edilmesine ve enerji simülasyonu için hızlı bir şekilde tasarım alternatiflerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır (Kim, 2016).

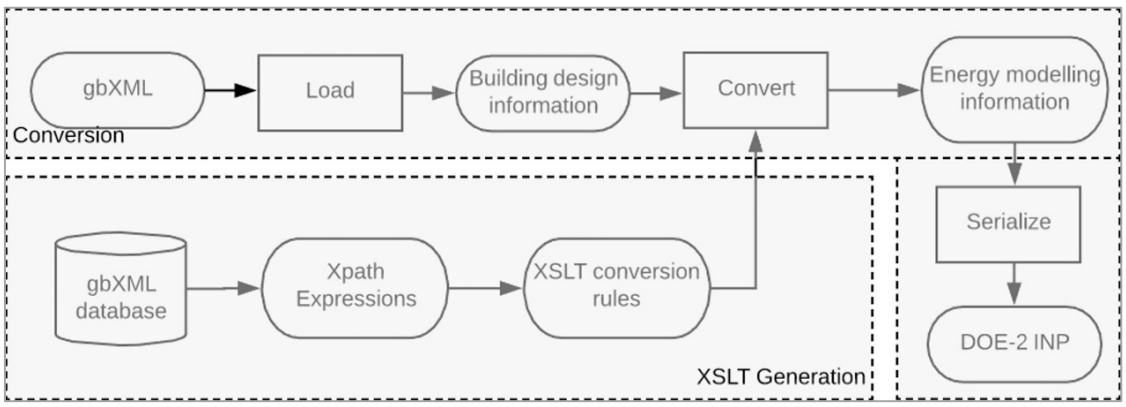
Gourlis ve Kovacic, Revit'in bir gbXML dosyasını (geometri) dışa aktardığı ve bu dosyanın Sketchup içinde Openstudio Eklentisi aracılığıyla IDF dosyasına dönüştürüldüğü endüstri binaları için BIM tabanlı bir BEM yöntemini uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar, dönüşüme dayalı ayrıntılı Revit modelinde, çoğaltılan yüzeyler ve ayarlanan alanlar arasındaki açıklık ve boşluklar gibi birçok hatanın ortaya çıktığını göstermiştir. Bu durumun, ayrıntılı BIM modelinin geometrisinin BEM amacıyla kullanıma fazla karmaşık olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Basitleştirilmiş BIM modeline dayalı dönüşüm (BEM amacıyla basitleştirilmiş alan), daha iyi bir performans sergilemiş olmasına rağmen, dönüşüm sonrasında geometrinin manuel onarımının kaçınılmaz olduğu saptanmıştır (Gourlis ve Kovacic, 2017).

Oh ve diğ. gbXML dosyasından otomatik olarak IDF dosyasının oluşturulmasını sağlayan bir gbXML-IDF dönüştürücü sunmuşlardır. Mevcut sürümde yalnızca bina geometrisi dönüştürülebilir, ancak EnergyPlus için gerekli olan diğer verilerin manuel olarak girilmesi

gerekmektedir (Oh, Kim, Park ve Kim, 2011). Ek olarak, Garwood ve arkadaşları, BEM uygulamaları için Point Clouds'tan bir gbXML bina geometrisi çerçevesi oluşturulmasına yönelik bir model sunmuşlardır (Garwood, 2018).

Asl ve diğ. Dynamo'da, bulut tabanlı enerji analizini kullanarak tasarımcıların erken tasarım aşamasında çeşitli tasarım varyasyonlarının hızlı bir şekilde değerlendirilmesi yoluyla gün ışığını ve enerji kullanımını optimize etmelerini sağlayan entegre bir sistem geliştirmişlerdir. Tüm bina enerji simülasyonu için gerekli olan geometri bilgileri, fiziksel malzeme özellikleri ve konum verileri Revit tarafından sağlanmaktadır. Temelde, bu tür BIM tabanlı BEM uygulaması, GBS'nin güncellenmiş bir sürümüdür (Asl, 2014).

Garcia ve Zhu, bir dizi veri dönüştürme talimatına göre Revit'ten eQUEST'e geçişi sağlayan bina bilgisini (geometri, konum ve malzeme dahil) kolaylaştıran yeni bir Extensive Style Sheet Language Transformation (XSLT) tabanlı bir dönüştürücü yarattı. Çerçevenin çalışma prensibi Şekil 3.24'te gösterilmiştir. Yeni XSLT, bir gbXML veritabanından önceden oluşturulmuş bir dizi bilgi alışverişi talimatı sunmak üzere tasarlanmıştır. Tasarlanan XSLT, gbXML dosyasındaki her bir yapı öğesini tanımlar, hedeflenen bina bilgilerini alır ve bunları dönüşüm yönergesine göre DOE-2 INP şemasına aktarır. XSLT tabanlı dönüştürücünün etkinliği, Green Building Studio'nun üç gerçek örnek çalışmasıyla karşılaştırılarak test edilmiştir ve sonuçlar, XSLT tabanlı dönüştürücünün gbXML ile DOE-2 INP şemaları arasındaki mevcut bilgi alışverişinde ortaya çıkan bariz uyuşmazlıkları giderebildiğini göstermiştir (Garcia ve Zhu, 2015). Benzer bir yöntem 2014 yılında Garcia ve Zhu tarafından, XSLT stil sayfasına dayanan Revit ve eQUEST'i bağlamak için uygulanmıştır (Guzmán ve Zhu, 2014).



Şekil 3.24. XSLT tabanlı dönüşüm sürecinin çerçevesi

Ham ve Golparvar-Fard, malzeme bozulmalarından kaynaklanan termal dirençlerin zayıflamasını hesaba katmayan BIM elemanlarının kavramsal termal özelliklerinin kullanılması nedeniyle, BIM tabanlı BEM yöntemlerinin çoğunun doğru olmayabileceğini belirtmiştir. Bu sorunu çözmek için, gbXML tabanlı BIM elemanlarındaki gerçek zamanlı termal özellikleri 3D termografi ile otomatik olarak güncellemek için bir yöntem geliştirmişlerdir (gerçek ısı transfer koşulunu ölçen) (Ham ve Golparvar-Fard, 2015).

Daha önce de belirtildiği gibi IES-VE, Revit'ten gbXML'ye aktarılan bölge ve alan bilgilerini destekler. Che ve diğ. enerji bilgisini gbXML formatında BIM tasarım modelinden ve inşaat planlama modelinden IES-VE'ye dönüştüren Revit IES-VE Araç Takımları aracılığıyla hem tasarım hem de inşaat sürecinde bina enerji performansını değerlendirmek için mantıklı bir senaryo sunmuşlardır (Che, Gao, Chen ve Nguyen, 2010).

Azhar ve diğ. sürdürülebilirlik analizi oluşturmak için gbXML veri şeması aracılığıyla BIM tabanlı IES-VE simülasyonunu uygulamıştır. BIM tabanlı analiz sonuçları, LEED sertifikasyonu için gerekli dokümantasyonun oluşturulmasında kullanılmıştır. Ancak, IES-VE'nin yaygın bir şekilde benimsenmesinin önünde karmaşıklık ve yüksek maliyet gibi engeller varlığını sürdürmektedir (Azhar, 2011).

Jalaei ve Jrade, BIM, yaşam döngüsü analizi (LCA), enerji analizi ve aydınlatma simülasyon araçlarını yeşil bina sertifikasyon sistemine bağlayan otomatik bir model geliştirmiştir. Enerji analizi ve aydınlatma simülasyonu açısından, Revit modelinden bina geometrisi ve termal bölge verileri ile harici veritabanından elde edilen malzeme verileri, IES-VE eklentisi tarafından kullanılmak üzere gbXML dosyasına entegre edilmektedir (Jalaei ve Jrade, 2014a).

Rahmani ve diğ. tasarım alternatiflerini, parametrik bina enerji performans analizinin uygulanmasını ve BIM modelinin optimize edilmiş tasarım seçeneğiyle otomatik olarak güncellenmesini sağlayan Revit to Green Building Studio Optimization (Revit2GBSOpt) adlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Gün ışığının (LEED gündüz aydınlatması) ve tüm bina enerji performansının çok amaçlı olarak ayarlandığı Revit2GBSOpt performansını değerlendirmek için bir örnek çalışması geliştirilmiş ve optimize edilmiş tasarımı belirlemek için 54 tasarım seçeneği oluşturuldu ve analiz edilmiştir (Rahmani Asl, 2013).

Kamel ve Memari, gbXML aracılığıyla Revit modelinden bina bilgilerini alabilen ve bu verileri gbXML düzeltici aracı ile OpenStudio aracılığıyla EnergyPlus için IDF dosyasına aktarabilen bir Otomatik Bina Enerji Modelleme ve Değerlendirme Aracı (ABEMAT) sunmuştur. ABEMAT'ın mevcut sürümü yalnızca yapı kabuğu sistemini işleyebilmekte olup, HVAC sistemi ve çizelgeleri gibi diğer verilerin manuel olarak girilmesi gerekmektedir (Kamel ve Memari, 2018).

Calquin ve ark. Revit ile Ecotect ve Revit ile DesignBuilder arasındaki birlikte çalışabilirliği sırasıyla gbXML aracılığıyla test ettiler. Testler, geometri, termal bölge ve malzeme verilerinin BIM'den BEM araçlarına dönüşümüne odaklanmıştır. Sonuçlar, geometri (iç duvarlar hariç) ve bölge dönüşümlerinin DesignBuilder için doğru olduğunu göstermektedir. Bölge bilgileri Ecotect tarafından kabul edilebilirken, Revit 2013 veya sonraki sürümlerinde oluşturulan bazı yapı elemanları Ecotect tarafından tanınamamaktadır. Ayrıca malzeme bilgileri, kullanıcılar tarafından manuel olarak eklenmesi gereken Ecotect veya DesignBuilder'a başarıyla dönüştürülmemiştir (Calquin, 2014).

Jalaei ve Jrade, enerji ve gün ışığı bakımından tasarım seçeneklerini analiz ederek mimari tasarım ekibinin binaları daha sürdürülebilir hale getirmesine yardımcı olmayı amaçlayan entegre bir platform önerdiler ve uyguladılar. Projenin amaçlarından biri, gbXML ve IFC veri şemasına dayalı Revit eklentisi geliştirerek Revit ve Ecotect'i yeşil bina sertifikasyon sistemine entegre etmektir. IFC tabanlı dönüşümle karşılaştırıldığında, gbXML tabanlı dönüşüm, yalnızca geometrik bilgileri değil, aynı zamanda gbXML dosyası için yeterli değişiklikler yaparak konum, bina tipi, VAV tek kanal ve inşaat atamalarını içeren daha iyi geliştirilmiştir. Termal bölgeler, Revit'te oluşturulan tüm alanların BEM için termal bölgelere dönüştürülmesiyle tanımlanmaktadır. Ancak, dönüştürme işlemi sırasında bazı eksik bilgilerin (örneğin, malzemeler) kullanıcı tarafından manuel olarak girilmesi gerekmektedir ve gbXML dosyasındaki değişikliklerin karmaşık bir süreç olduğu kabul edilmektedir (Jalaei ve Jrade, 2014b).

Çizelge 3.9'da BIM tabanlı BEM sürecinin sorunlarına araştıemacılar tarafından yapılan gbXML tabanlı çözümler özetlenmiştir.

Çizelge 3.9. BIM tabanlı BEM sürecinin sorunlarına araştırmacılar tarafından yapılan gbXML tabanlı çözümler

Sorunlar		Çözüm	Kaynak
Farklı araçların birlikte çalışılması		BIM tabanlı GBS simülasyonu	(S. Kim, 2016), (Abanda ve Byers, 2016)
		gbXML'deki gerçek zamanlı termal özellikleri güncelleme	(Ham ve Golparvar-Fard, 2015)
		IES-VE plugin	(Jalaei ve Jrade, 2014a)
		Revit to Green Building Studio Optimization	(Rahmani Asl, 2013)
		Bina Enerji Modelleme ve Değerlendirme Aracı (ABEMAT)	(Kamel ve Memari, 2018)
		gbXML BIM dosyasını okuyabilen Building Energy Analysis Model (BEAM)	(Salakij, 2016)
Bileşenler arasında veri aktarımı	Geometri	gbXML dosyasının Sketchup içinde Openstudio Eklentisi aracılığıyla IDF dosyasına dönüştürüldüğü	(Gourlis ve Kovacic, 2017)
		gbXML-IDF dönüştürücü	(Oh, 2011)
	Material	Dinamo entegre sistem	(Asl, 2014)
		(XSLT) tabanlı bir dönüştürücü	(Garcia ve Zhu, 2015), (Guzmán ve Zhu, 2014)
	Termal Bölge	BIM-based IES-VE simulasyon	(Azhar, 2011)

3.8.3. BIM tabanlı Modelica BEM

Nesneye Yönelik Fiziksel Modelleme (OOPM)[1], denklem tabanlı ve yapılandırılmış modelleme süreci sağlamayı amaçlayan, hızlı büyüyen ve yaygın bir modelleme yöntemidir. Modelica, karmaşık, önemli ve heterojen fiziksel sistemleri modellemek için kullanılan denklem tabanlı bir OOPM dilidir. Modelica tabanlı bir OOPM yaklaşımı, bir fiziksel sistemin topolojisinin bileşen seviyesinin bileşen-bağlantı temsili aracılığıyla modellenmesi için geliştirilmiştir. Modelica tabanlı BEM, binanın Modelica ortamında modellendiği ve simüle edildiği Modelica tabanlı OOPM'nin belirli bir örneğidir. Modelica kullanımı, model bileşeni, çözücüler ve Modelica simülasyon ortamı sağlayan bir Modleica kitaplığına ihtiyaç duyar. LBNL Modelica kitaplığı ve Dymola genellikle sırasıyla model bileşenini ve simülasyon çözücüsünü ve simülasyon ortamını sunmak için kullanılmaktadır (Kim, 2015).

Son zamanlarda, bir grup araştırma, OOPM yaklaşımı ve Modelica kullanılarak BIM tabanlı bina enerji simülasyonu için Modelica kitaplığının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

[1] Object-Orientated Physical Modelling

Bina termal simülasyonu için BIM ve Modelica tabanlı BEM entegrasyonunun bir çerçevesi (Jeong, 2016)'da sunulmuştur. Çerçevenin amaçları, BIM modelini termal özelliklere sahip ön işleme BIM modeline dayalı Modelica tabanlı BEM modeline dönüştürmek, LBNL Modelica kitaplığı tarafından Modelica tabanlı BEM modelini simüle etmek ve tasarımcılar için Revit ortamına simülasyon sonuçlarının geri bildirimlerini sağlamaktır. Jeong ve Son (Jeong ve Son, 2016), BIM yazma aracında (ör. Revit) tanımlanan yapı topolojisini OOPM kullanarak Model tabanlı BEM modelinin alan sınırı koşullarına çevirmek için bir algoritma sunmuştur. Önerilen algoritma, BESTEST 600 modelinde üç test senaryosu ile test edilmiştir ve sonuçlar, algoritmanın BIM ile Modelica tabanlı BEM arasında yüksek doğrulukta çeviri sağladığını göstermektedir. Kim vd. (Kim, 2015), bir Nesne Yönelimli Fiziksel Modelleme (OOPM) ve Modelica dili kullanarak BIM tabanlı BEM süreci için bileşen düzeyinde enerji performansında Revit2Modelica'yı uygulamıştır.

Çizelge 3.10'da araştırmacılar tarafından yapılan BIM tabanlı BEM'in sorunlarını çözmek için önerilen yeni yöntemler, arayüzler, uygulamar, çerçeveler vb sıralanmaktadır.

Çizelge 3.10. BIM tabanlı BEM için önemli bulgular ve yenilikler

Yazar	Yıl	Yeni Yöntem
(Petersen ve Svendsen, 2011)	2011	Parametre değişimleri yaparken, kontrol sisteminin yapılandırılmasını kolaylaştıran bir yöntem geliştirmiş.
(Welle, 2011)	2011	ThermalOpt adlı bir yöntem geliştirdi
(Rahmani Asl, 2013)	2013	Revit2GBSOpt
(Lin, 2014)	2014	MDO (Multidisciplinary Design Optimization) Design Framework
(Jeong, 2014)	2014	BIM2BEM çerçevesi
(Negendahl, 2015)	2015	Tasarımının ilk aşamalarında hızlı bir değerlendirme yöntemi
(Rahmani Asl, 2015)	2015	PBOpt (BIM-based performance optimization)
(Jeong ve Son, 2016)	2015	ModelicaBIM library, Revit2Modelica framework
(Farias, 2019; Kota, 2016)	2016	RAESR (Rapid Analysis of Energy Simulation Results)
(Asl, Xu, Shang, Tsai ve Molloy, 2016)	2016	Formbased Energy Performance Regression Model (FEPRM)
(Arayici, Fernando, Munoz ve Bassanino, 2018)	2018	IDM / MVD[1] çerçevesi değişim gereksinimlerini yakalar ve Industry Foundation Classes (IFC) şemasına çevirir.
(Kamel ve Memari, 2018)	2018	ABEMAT
(Andriamamonjy, 2018)	2018	BII (BIM-IFC-Ifc2Modelica)
(Gao ve Zhang, 2019)	2019	BIM tabanlı gerçek zamanlı bina enerji simülasyon yöntemi
(Kamel ve Memari, 2019)	2019	BIM-to-BEM interoperability process (BBIP)
(Ramaji, 2020)	2020	Model Transformation Algorithm

[1] Information Delivery Manual (IDM) ve Model View Definition (MVD)

3.9. BIM-BEM Entegrasyonunun Geleceği

Bina Bilgi Modellemesi (BIM) ve Bina Enerji Modellemesi (BEM) entegrasyonu, yapı çevresinde enerji verimliliğini ve sürdürülebilirliği önemli ölçüde artırmaya yönelik büyük bir potansiyele sahiptir. Özellikle yapay zeka (AI) ve üretken tasarım alanlarındaki son teknolojik gelişmelerin, bu entegrasyon sürecinde kilit bir rol oynaması beklenmektedir. BIM ve BEM arasındaki karşılıklı ilişki, enerji performansı tahminlerinin iyileştirilmesine, enerji tüketiminin azaltılmasına ve bir binanın yaşam döngüsü boyunca maliyet tasarruflarına yol açabilir (Alhammad, Eames ve Vinai, 2024; Kozlovska, Petkanic, Vranay ve Vranay, 2023).

BIM, hem geometrik hem de geometrik olmayan verileri içeren bir binanın kapsamlı dijital temsili olarak işlev görür ve bu veriler enerji yönetim sistemlerini optimize etmek amacıyla kullanılabilir. Bina Enerji Yönetim Sistemleri (BEMS) tarafından sağlanan gerçek zamanlı verilerin BIM ile entegrasyonu sayesinde, paydaşlar enerji performansına dair daha doğru analizler gerçekleştirebilirler (Alhammad, 2024; Kozlovska, 2023). Bu entegrasyon, enerji verimsizliklerinin tespit edilmesine ve tasarım aşamasının erken aşamalarında düzeltici önlemlerin uygulanmasına olanak tanıyarak, enerji yenileme işlemlerini kolaylaştırır ve genel bina performansını artırır (AlizadehKharazi, Alvanchi ve Taghaddos, 2020; Hamida, Ahmed, Asif ve Almaziad, 2020). Ayrıca BIM ve BEM arasındaki birlikte çalışabilirlik büyük önem taşımaktadır; araştırmalar, bu birlikte çalışabilirliğin geliştirilmesinin daha verimli enerji analizlerine ve daha iyi karar alma süreçlerine yol açabileceğini göstermektedir (Chen, Deng, Chong ve Chen, 2023; Elnabawi, 2020).

Bu entegrasyonda yapay zekanınn rolü göz ardı edilemez. Yapay zeka algoritmaları, BIM ve BEM'den üretilen büyük miktardaki veriyi analiz ederek enerji tüketim kalıplarını tahmin edebilir ve bina tasarımlarını optimize edebilir. Örneğin, üretken tasarım araçları, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik gibi belirli performans kriterlerine dayalı olarak bir dizi tasarım alternatifi keşfetmek için AI kullanabilir (Kang, 2020; Tahmasebinia, 2022). Bu yetenek, mimarlar ve mühendislerin enerji kullanımını en aza indirirken kullanıcı konforunu en üst düzeye çıkaran en uygun tasarım çözümlerini belirlemelerine olanak tanımaktadır (Watfa, Hawash ve Jaafar, 2021). Ayrıca AI, BIM ve BEM arasındaki veri alışverişinin otomatikleştirilmesini kolaylaştırarak, enerji modellerinin en son bina performansı verileriyle sürekli güncellenmesini sağlamaktadır (Yuan, Hu, Lin ve Zhang, 2021).

Sonuç olarak, yapay zeka, üretken tasarım gelişmelerle desteklenen BIM-BEM entegrasyonunun gelecekteki potansiyeli, inşaat sektörü için dönüştürücü bir fırsat sunmaktadır. Bu teknolojilerden yararlanarak, paydaşlar enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve genel bina performansında önemli iyileştirmeler elde edebilirler. Bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmeli ve BIM-BEM entegrasyonunun tam olarak faydalarını gerçekleştirmek için farklı platformlar arasında birlikte çalışabilirliği kolaylaştıracak standart uygulamalar oluşturulmalıdır.

3.10. BIM-BEM İçin Sürdürülebilirlik Yaklaşımları

Bina Bilgi Modellemesi (BIM) ve Bina Enerji Modellemesi (BEM) entegrasyonunun, sürdürülebilir bina tasarımında enerji verimliliğini önemli ölçüde artırarak ve kapsamlı çevresel etki analizlerini kolaylaştırarak dönüştürücü bir yaklaşım olarak ortaya çıktığı görülmektedir. BIM tabanlı BEM sentezi, gelişmiş hesaplama araçlarını kullanarak, enerji tüketimi ve çevresel sürdürülebilirliği ele alarak bina performansını yaşam döngüsü boyunca optimize etmektedir.

BIM, çok disiplinli bilgileri bir araya getiren temel bir platform olarak mimarların, mühendislerin ve inşaat profesyonellerinin bina tasarımlarını uyumlu bir şekilde görselleştirmelerine ve analiz etmelerine olanak tanır. Bu entegrasyon, enerji verimli tasarım stratejilerinin proje yaşam döngüsünün erken aşamalarında belirlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Örneğin, Liu ve arkadaşları, bir binanın yönünün BIM ve enerji simülasyon yazılımı aracılığıyla analiz edilmesinin, enerji tüketimini önemli ölçüde etkileyebileceğini ve bu durumun bilinçli tasarım kararlarının önemini vurguladığını göstermiştir (Liu, Ding, Li ve Xue, 2023). Ayrıca Borkowski, IoT'nin BIM yeteneklerini geliştirerek enerji sistemlerinin gerçek zamanlı izlenmesini ve yönetilmesini sağladığını, bunun da operasyonel verimliliği artırabileceğini vurgulamıştır (Borkowski, 2024).

BIM ve BEM arasındaki birlikte çalışabilirlik, doğru enerji performansı değerlendirmelerine ulaşmak için hayati öneme sahiptir. Ciccozzi, BIM tabanlı BEM sürecinin yalnızca tasarım seçeneklerini geliştirmekle kalmadığını, aynı zamanda hataları azalttığını ve inşaat sektöründe üretkenliği artırdığını belirtmiştir (Ciccozzi, de Rubeis, Paoletti ve Ambrosini, 2023). Bu birlikte çalışabilirlik, BIM modellerinin enerji analizi için uygun formatlara otomatik olarak dönüştürülmesine olanak tanıyarak tasarımdan performans

değerlendirmesine kadar olan iş akışını hızlandırır (Jeong ve Son, 2016). Ayrıca BEM araçlarının BIM sistemine entegrasyonu, tasarımcıların projelerinin çevresel etkilerini anında analiz etmelerini sağlayarak daha sürdürülebilir binaların ortaya çıkmasını desteklemektedir (Reeves, Olbina ve Issa, 2012).

Sürdürülebilir bina uygulamaları, BIM ile ilişkili yaşam döngüsü faydalarıyla daha da desteklenmektedir. Kapsamlı veri yönetimini kolaylaştıran BIM, paydaşların bina performansını zaman içinde optimize etmelerini sağlarken, bu durum operasyonel maliyetlerin azaltılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi için gereklidir (Zhang, 2024). Örneğin, Azhar ve arkadaşlarının savunduğu gibi, tasarım aşamasında performans analizlerinin yapılabilmesi, inşaat sonrası yenileme yerine sürdürülebilirlik kriterlerine proaktif olarak uyum sağlanmasına olanak tanımaktadır (Azhar, 2011).

BIM tabanlı BEM entegrasyonu sayesinde gerçekleştirilen çevresel etki analizleri de dikkate değerdir. Gelişmiş simülasyon araçları kullanılarak tasarımcılar, enerji kullanımı, malzeme seçimi ve atık üretimi gibi çeşitli senaryoları değerlendirebilir ve bu sayede daha bilinçli karar verme süreçlerine ulaşabilirler (Wong ve Fan, 2013). Andriamamonjy ve arkadaşlarının çalışması, otomatik iş akışlarının enerji performansı simülasyonlarını nasıl geliştirdiğini ve bu sayede bir binanın enerji dinamiklerinin daha doğru bir şekilde temsil edildiğini göstermektedir (Andriamamonjy, 2018). Bu yetenek, iyileştirme alanlarını belirlemek ve sürdürülebilirlik standartlarına uyumu sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, BIM ve BEM'in entegrasyonu, sürdürülebilir bina tasarımında önemli bir ilerlemeyi temsil etmekte, enerji verimliliğini artırmakta ve kapsamlı çevresel etki analizlerine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım tasarım ve inşaat süreçlerini iyileştirmenin yanı sıra, bina yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliği ön planda tutan işbirlikçi bir ortamı teşvik etmektedir.

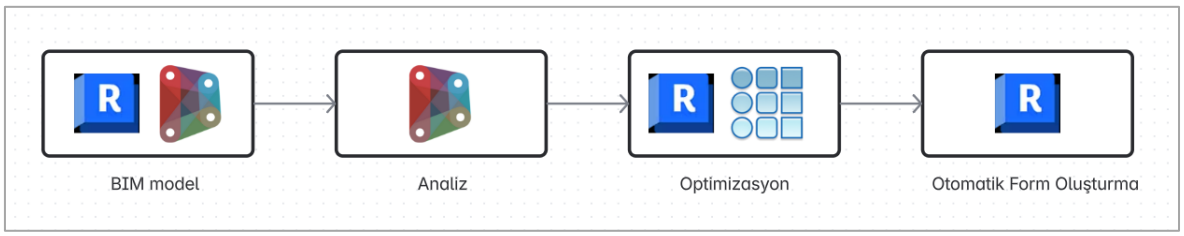
4. YÖNTEM

Bu bölüm, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) bağlamında üretken tasarım ve biçim grameri ilkelerinin bütünleştirilerek erken tasarım aşamasında Bina Enerji Modellemesi'nin (BEM) optimize edilmesine yönelik kullanılan yöntemsel çerçeveyi ortaya koymaktadır. Söz konusu yaklaşım, manuel ve zaman alıcı geleneksel yöntemlerin yerine, tasarım sürecinin otomasyonunu ve analitik değerlendirmesini mümkün kılan hesaplamalı araçların entegrasyonunu amaçlamaktadır. Özellikle, erken tasarım sürecindeki keşif kapasitesinin yetersiz kaldığı yönünde eleştirilen BIM'in yetkinliğini artırmak üzere üretken tasarım tekniklerinin entegrasyonuna odaklanılmaktadır. Bu bütünleşik yaklaşım, önceden tanımlanmış enerji performansı kriterlerine göre çok sayıda tasarım alternatifinin hızlı bir biçimde değerlendirilmesine olanak tanıyarak geniş bir çözüm alanının keşfini mümkün kılmaktadır Böylece, tasarım seçeneklerinin daha erken bir aşamada etkin ve kapsamlı bir biçimde analiz edilmesi sağlanmakta; detaylı enerji modellerinin oluşturulmasında karşılaşılan zorluklar azaltılmaktadır. Ayrıca, bu entegrasyon sayesinde mimari tasarım ile yapısal bileşenler arasında daha akışkan bir bilgi alışverişi sağlanarak, tasarım sürecinin başından itibaren bütüncül bir yaklaşım benimsenmektedir. BIM'in çok disiplinli bilgi depolama kapasitesi ile üretken tasarımın keşifçi gücünün bir araya getirilmesi, detaylı bina tasarımlarına geçilmeden önce sürdürülebilirlik odaklı tasarım ölçütlerinin analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu stratejik entegrasyon, performans analizlerinin çoğunlukla ileri tasarım aşamalarına ertelenmesinden kaynaklanan gecikmelere çözüm sunarak, önemli düzeyde optimizasyon ve bilinçli karar alma fırsatlarının önünü açmaktadır.

BIM tabanlı BEM teknolojileri, tasarım seçeneklerini karşılaştırmak ve binanın ekolojik ayak izini iyileştirmek için en iyi çözümü oluşturmak için fırsat sunar. Ancak, bu araştırmada gözlemlendiği gibi, tasarım uzmanları hala bu teknolojilerin faydalarını en üst düzeye çıkarmak için süreçlerini yeniden düzenlemeye çalışıyorlar. Bu çalışmada, yüksek performanslı binalar için tasarım sürecinde bilgi paylaşımını kolaylaştırmak ve sistemleştirmek için erken tasarım aşamasına uygun BIM tabanlı BEM çerçevesi önerilmiştir. İlk adımda Revit-Dynamo tarafından amacımıza uygun algoritma oluşturulur. Dynamo parametrik programlama, Revit-Dynamo etkileşim komutları ve yerleşik matematiksel işlemler yardımıyla karar değişkenlerini kontrol etmek için kullanılır. Program modülleri, model bileşenlerinden karar değişkenlerini yakalama ve aralarında bağlantı kurma yeteneğine sahiptir. Karmaşık bilgiler, daha az insan müdahalesi ile karar

değişkenlerinin değiştirilmesi olarak modeli küresel olarak düzenleyebilen paralel kontrol modüllerine düzleştirilir. Bina modeli ve simülasyon araçları arasındaki arayüz, Dynamo açık kaynak paketleri ve modelleme platformu ile simülasyon platformu arasındaki gerçek zamanlı veri etkileşiminin işlevini gerçekleştiren Phyton programlama ile birbirine bağlanabilir. Önerilen süreçte enerji tüketimini simüle etmek için Green Building Studio (GBS) kullanılır.

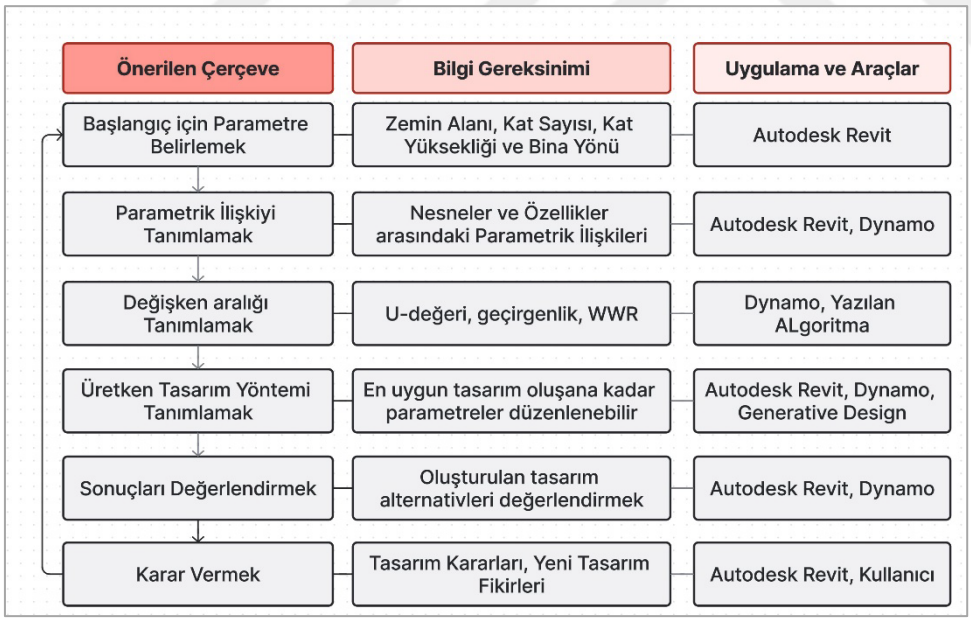
Şekil 4.1'de sunulan iş akışı, BIM tabanlı üretken tasarım sürecinin dört temel aşamadan oluştuğunu göstermektedir. İlk aşamada, Revit yazılımı aracılığıyla tasarım girdilerinin tanımlandığı parametrik bir BIM modeli oluşturulmaktadır. Bu model, enerji analizi için gerekli geometrik verileri sağlayarak sürecin temelini oluşturur. İkinci aşamada, bu model Dynamo aracılığıyla analiz araçlarına entegre edilerek belirlenen iklim verileri doğrultusunda enerji performans analizleri gerçekleştirilir. Üçüncü aşamada ise elde edilen analiz çıktıları doğrultusunda, kullanıcı tarafından tanımlanan hedefler ve kısıtlar çerçevesinde tasarım alternatifleri optimize edilir. Son aşamada ise optimize edilmiş varyasyonlar otomatik olarak Revit ortamında yeniden modellenerek, uygulamaya hazır bina formları oluşturulur. Bu süreç, üretken tasarım yaklaşımının BIM ortamına entegre edilmesiyle enerji etkin mimari çözümlerin sistematik şekilde üretilmesini mümkün kılmaktadır.



Şekil 4.1. BIM tabanlı BEM ve üretken tasarım sürecinde analiz, optimizasyon ve otomatik form oluşturma adımlarını içeren iş akışı

Önerilen çerçeve, erken tasarım aşamasında sürdürülebilir bina tasarımını desteklemek amacıyla geliştirilmiş olup, BIM tabanlı BEM ortamında üretken tasarım yaklaşımını entegre ederek farklı tasarım alternatiflerinin üretilmesini, analiz edilmesini ve enerji performansı açısından optimize edilmesini hedeflemektedir. Konsept tasarım sürecinde, ilk olarak enerji verimliliği yüksek bina formlarının otomatik olarak oluşturulması ve ardından yapı kabuğu tasarımına yönelik pencere yerleşimi, boyutu ve opaklık/şeffaflık oranı gibi parametrelerin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen iş akışı, enerji etkin

tasarım kriterlerini üretken tasarım süreciyle bütünleştiren sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. İlk aşamada, tasarım sürecine yön verecek biçim faktörü ve toplam kat alanı gibi performans kriterleri tanımlanmakta; ardından, biçim grameri kuralları çerçevesinde alternatif bina formları, Revit-Dynamo ortamında parametrik olarak üretilmektedir. Minimum biçim faktörü ve maksimum kat alanı hedeflenerek en uygun form seçilmektedir. İkinci aşamada ise, enerji kullanım yoğunluğu (EUI) en düşük olacak şekilde yapı kabuğu tasarım alternatifleri oluşturulmaktadır. Bu kapsamda, pencere konumu, boyutu ve geçirgenlik oranı gibi değişkenler parametrik olarak tanımlanmıştır. Elde edilen geometriler, gbXML formatında enerji simülasyonuna uygun hâle getirilerek BEM yazılımlarına aktarılmıştır. İklim ve konum verilerine bağlı olarak yapılan enerji analizleri sonucunda, enerji verimliliği en yüksek olan form belirlenmekte ve optimum tasarım seçilmektedir. Süreç, gerekirse iteratif olarak tekrar edilmekte; elde edilen bulgular ışığında tasarım sürecinin bir sonraki aşamasına geçilmekte ya da yeniden optimizasyon gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.2, önerilen çerçeve sürecini ve bu süreçte kullanılan araçlar ile uygulamaları bütüncül bir yapıda göstermektedir.



Şekil 4.2. Önerilen çerçeve süreci ve süreçte kullanılan araçlar ve uygulamalar

4.1. Parametrik Tasarım ve Biçim Grameri ile Form Üretimi

Dynamo platformunda geliştirilen bu algoritma, Üretken Tasarım süreçlerini desteklemek amacıyla tasarlanmıştır. Algoritmanın girdileri, bina formunu oluşturan çeşitli

parametrelerden oluşmaktadır. Bu parametreler, tasarımın geometrik ve performans kriterlerine uygun bir şekilde optimize edilmesini sağlar. Algoritmanın çıktıları ise maksimum kat alanı ve minimum biçim faktörü gibi performans odaklı hedeflere göre değerlendirilir. Bina formunun oluşturulması sürecinde, biçim gramer kuralları uygulanarak sistematik bir tasarım dili geliştirilmiştir. Bu kurallar, bina geometrisinin oluşturulması ve en uygun hale getirilmesi için temel prensipleri sağlar. Sonuç olarak, algoritma hem estetik hem de enerji verimliliği açısından optimize edilmiş bina formları üretmeyi hedefleyen bir tasarım aracı olarak işlev görür.

Algoritmanın ilk adımında, yapı formunu oluşturmak için biçim grameri kuralları kullanılmaktadır. Bu kurallar, bina kütlesinin nasıl şekilleneceğini belirleyen temel adımları tanımlar. Kullanıcılar, bu kuralları sadece olduğu gibi kullanmakla kalmaz; aynı zamanda kendi ihtiyaçlarına göre değiştirip geliştirebilir. Böylece algoritma, farklı kullanıcı senaryolarına uyum sağlayabilecek şekilde esnek bir yapı kazanır. Kural setinin kullanıcıya açık olması, farklı iklim koşulları veya tasarım hedeflerine göre çeşitli bina formlarının üretilmesini mümkün kılar. Bu yaklaşım, enerji verimli tasarımlar oluşturmak amacıyla algoritmanın ilk aşamasında karar verme sürecine aktif katkı sağlar.

Biçim faktörü

Biçim faktörü, bir binanın veya yapının tasarımının, enerji verimliliği ve ısı transferi üzerindeki etkisini hesaplamak için kullanılan bir terimdir. Biçim faktörü, binanın şeklinin, oranların ve dış yüzeyin nasıl bir etki yarattığını ölçer. Basit bir biçim faktörü formülü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

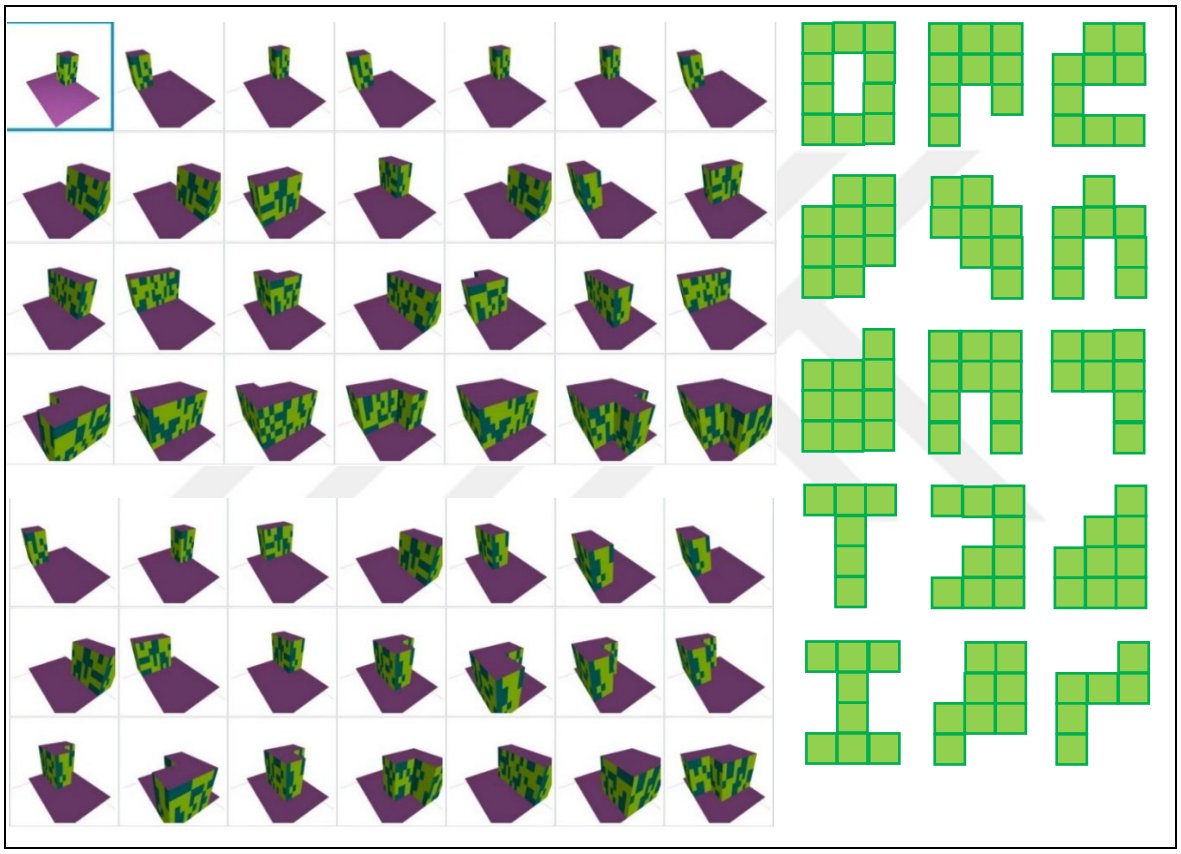
Biçim Faktörü (F) = Yüzey Alanı (A) / Hacim (V)

- Biçim Faktörü (F), binanın şekil ve oranlarının enerji etkinliği üzerindeki etkisini ifade eder.
- Yüzey Alanı (A), binanın dış yüzeyinin toplam alanını ifade eder.
- Hacim (V), binanın iç hacmini ifade eder.

Biçim faktörünün bu basit formülü, bir binanın veya yapının kompaktlığını ve şeklinin enerji verimliliğini nasıl etkilediğini anlamak için kullanışlıdır. Daha yüksek bir biçim faktörü,

daha fazla dış yüzey alanına göre daha küçük bir iç hacmi temsil eder ve bu, enerji kaybını artırabilir. Daha düşük bir biçim faktörü, daha fazla iç hacme göre daha az dış yüzey alanını temsil eder ve bu enerji tasarrufuna katkıda bulunabilir.

Biçim faktörü, bina tasarımının optimizasyonunda ve enerji etkinliği iyileştirmelerinin değerlendirilmesinde kullanılır. İyi tasarlanmış bir bina, daha düşük bir biçim faktörüne sahip olabilir ve bu da enerji tasarrufu sağlayabilir (Çelebi, 2022).

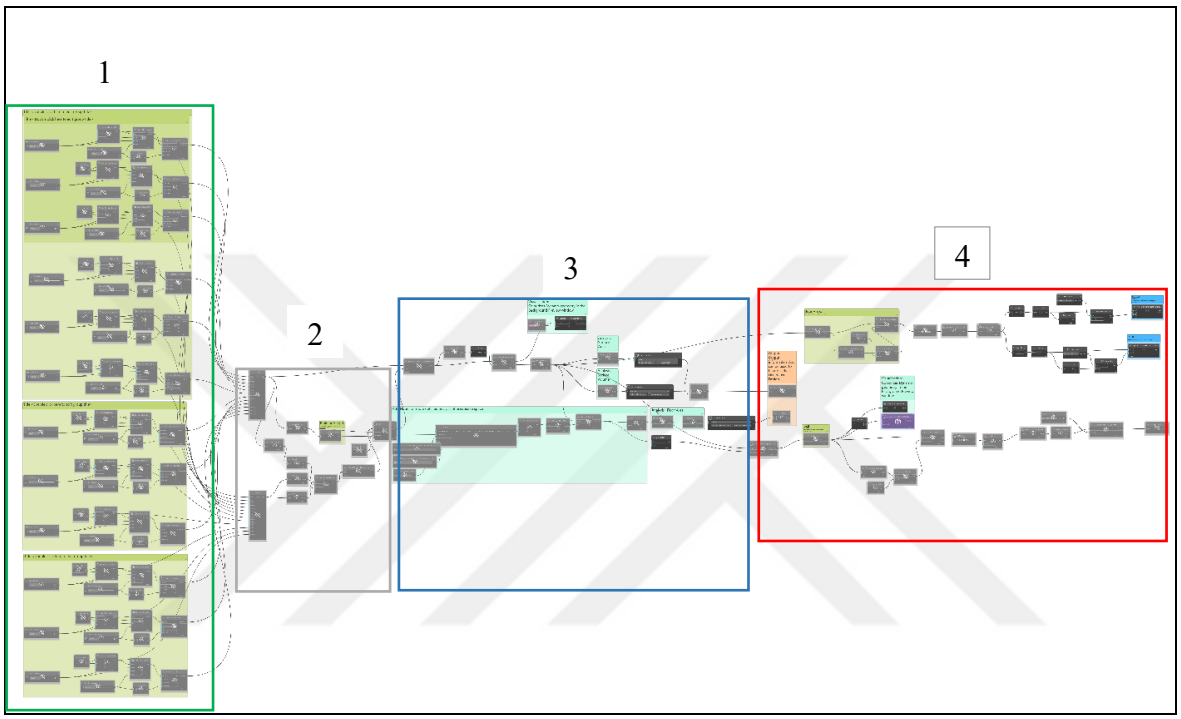


Şekil 4.3. Biçim grameri kuralları ile üretilebilecek olası formlar

4.2. Üretken Tasarım için Biçim Grameri Tabanlı Algoritma Geliştirme

Bu aşamanın sonunda, farklı bina formları sistematik bir şekilde analiz edilerek performans hedefleri doğrultusunda en uygun form belirlenir. Bu analiz sürecinde, çeşitli formasyonlar biçim faktörü ve kat alanı gibi önemli performans parametreleri üzerinden karşılaştırılır. Karşılaştırmalar, enerji verimliliği, malzeme kullanımı, yapısal dayanıklılık gibi ölçütlere dayalı olarak gerçekleştirilir. Tasarım sürecinin bu aşaması, yalnızca performans kriterlerini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik gibi daha geniş

hedefleri de göz önünde bulundurur. Nihayetinde, en verimli sonuçları sunan tasarım alternatifleri değerlendirilerek, bina formu açısından optimal olan seçenek seçilir ve bu seçim doğrultusunda tasarım sürecinin bir sonraki aşamasına geçiş yapılır. Bu süreç, erken tasarım aşamalarında alınan kararların genel bina performansı üzerindeki etkilerini maksimize etmeyi amaçlayan bütüncül bir yaklaşımla desteklenir.



Şekil 4.4. Üretken tasarım için biçim grameri tabanlı algoritma geliştirme

Dynamo'da yazılmış bu algoritma, önerilen sürecin ilk aşamasını gerçekleştirmektedir. Ve bina formunun optimizasyonu için biçim grameri yöntemini kullanarak üretken tasarım uygulamaktadır. Algoritma, bina geometrisinin oluşturulması, form varyasyonlarının üretilmesi ve bu formların belirlenen kriterlere göre analiz edilmesi aşamalarını içermektedir. Şekil 4.4, Dynamo ortamında geliştirilen algoritmayı göstermektedir. Bu algoritma aşağıdaki temel bileşenlerden oluşmaktadır:

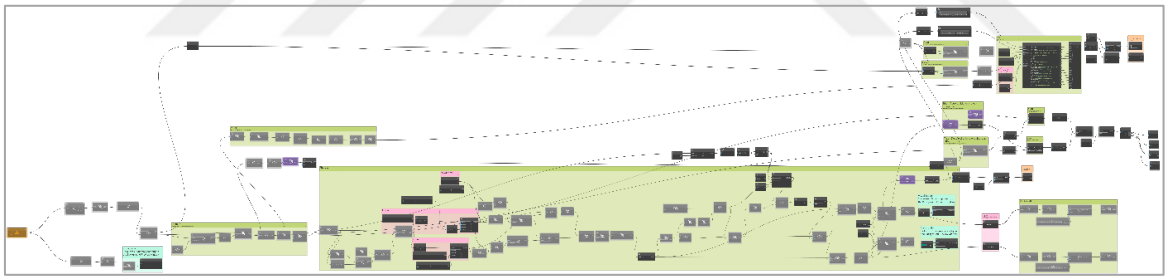
1. Biçim gramer kuralları (Sol bölüm – Yeşil alanlar): Algoritmanın başlangıcında yer alan bileşenler, bina formunun oluşturulmasını sağlayan kural tanımlarını içermektedir. Bu bileşenler, biçim grameri kurallarını belirleyen modüllerden oluşmakta olup, alternatif form varyasyonlarının üretilmesine yönelik giriş parametrelerini barındırmaktadır.

2. Geometri üretimi (Merkez bölüm – Gri modüller): Bu bölümde, biçim grameri kurallarına göre farklı form varyasyonları üretilerek bina kütlesinin oluşturulması sağlanır. Alternatif formlar için olasılıklar türetilirken, yapı bileşenleri (duvarlar, zemin, çatı) modellenerek analiz sürecine uygun hale getirilir.

3. Performans analizi (Sağ bölüm – Mavi ve turuncu alanlar): Üretilen bina formları, yüzey alanı/hacim (SA/V) oranı ve kat alanı açısından analiz edilerek değerlendirilir. Bu süreçte bina yüzey alanı ve kat alanı hesaplamaları gerçekleştirilir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak optimum form varyasyonları belirlenir.

4. Optimizasyon ve çıktılar (En sağ bölüm – Mor ve kırmızı alanlar): Üretken tasarım sürecinin çıktıları analiz edilerek en uygun bina formu seçilir. Optimum biçim faktörüne ve maksimum kat alanına sahip alternatifler belirlenir. Son olarak, nihai modelin parametrik analizleri tamamlanarak tasarım çıktıları oluşturulur.

4.3. Cephe Tasarımı İçin Geliştirilen Dynamo Algoritması

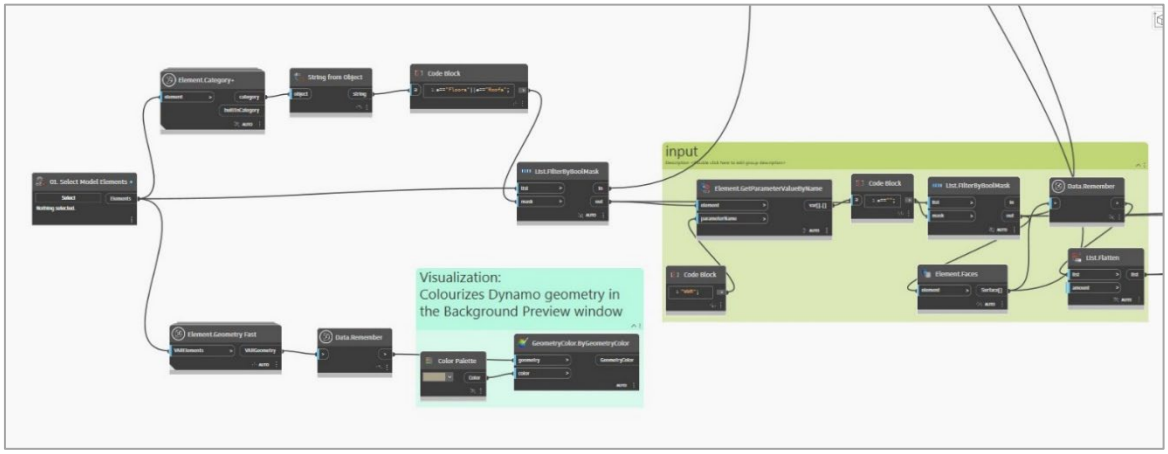


Şekil 4.5. Cephe tasarımı için geliştirilen Dynamo algoritmasının akış diyagramı. Algoritma, yönelime bağlı WWR değerlerine göre pencere yerleşimlerini parametrik olarak oluşturmakta ve alternatif tasarım senaryoları üretmektedir

Bu bölümde, bina kütlesi üzerinde pencere-duvar oranı (WWR) ve açıklık yerleşimi gibi parametrik cephe bileşenlerini tanımlamak amacıyla geliştirilen algoritmik sürece yer verilmiştir. Autodesk Revit ortamında çalışan Dynamo görsel programlama aracı kullanılarak oluşturulan bu algoritma, kullanıcı tarafından tanımlanan değişkenlere bağlı olarak çok sayıda alternatif cephe konfigürasyonu üretmektedir. Yönelime bağlı WWR oranları, parapet yüksekliği ve pencere konumları gibi parametreler dikkate alınarak her cephe yönü için farklı varyasyonlar elde edilmektedir. Şekil 4.5, cephe tasarımına yönelik

geliştirilen Dynamo algoritmasının işleyişini adım adım ortaya koyan bir akış diyagramını sunmaktadır.

Geliştirilen algoritma, seçilen bina formuna otomatik olarak pencere yerleştirme işlemini gerçekleştirmekte ve bu işlem sonucunda enerji performansı analizi için gereken geometrik veri setini oluşturmaktadır. Bu yapı sayesinde, farklı iklim senaryoları ve tasarım kriterleri için alternatif üretimi hızlanmakta; ayrıca üretken tasarım süreci enerji verimliliği açısından ölçülebilir hale gelmektedir. Aşağıda algoritmanın yapısal bileşenlerini ve işleyiş mantığını paylaşılmaktadır.



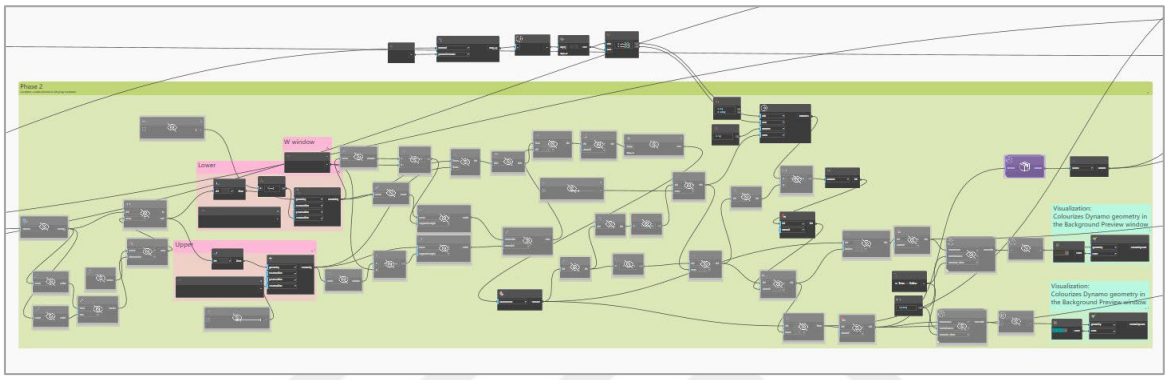
Şekil 4.6. Modeldeki elemanların kategoriye göre filtrelenmesi, WWR parametresinin okunması, cephe yüzeylerinin ayrıştırılması ve görsel kontrol amacıyla renklendirilmesini içeren algoritma modülü

Şekil 4.6'da sunulan bu bölüm, bina modelinde yer alan mimari elemanlardan cephe analizine dâhil edilecek olanların seçilmesi ve değerlendirilmesine yönelik süreci kapsamaktadır. İlk olarak, tasarımcıdan modeldeki mimari öğeleri (duvar, döşeme gibi) tanımlaması istenmektedir. Bu elemanlar türlerine göre sınıflandırılarak analiz dışı yüzeyler (örneğin döşemeler) elenmekte ve yalnızca cephe niteliği taşıyan yüzeyler üzerinde işlem yapılmaktadır.

Bir sonraki aşamada, analiz için ayrıştırılan elemanlara ait pencere-duvar oranı (WWR) gibi özel tanımlı parametrelerin verileri okunur. Bu değerler doğrultusunda, cephe tasarımına yönelik geçerli veriye sahip yüzeyler ayrıştırılarak detaylı incelemeye alınır. Bu işlem sayesinde, sadece enerji performansında etkili olacak cepheler değerlendirmeye katılmış olur. Seçilen yüzeyler daha sonra geometrik olarak ayrıştırılır ve analiz süreçlerinde

kullanılmak üzere kaydedilir. Bu işlem verilerin daha sonra tekrar kullanılmasına olanak tanıyarak hesaplama yükünü azaltır.

Son olarak, ayrıştırılmış yüzeyler renklendirilerek model üzerinde görsel olarak temsil edilir. Bu görselleştirme adımı, algoritmanın doğru çalışıp çalışmadığının kullanıcı tarafından doğrudan kontrol edilmesine olanak tanır. Bu sayede, cephe analizine alınan yüzeylerin konumu, kapsamı ve uygunluğu görsel olarak doğrulanabilir.



Şekil 4.7. Dynamo algoritmasının pencere açıklıklarının yerleştirilmesini ve görselleştirilmesini sağlayan modülüne ait görsel

Şekil 4.7'de yer alan görsel, geliştirilen Dynamo algoritmasının cephe elemanları üzerinde pencere açıklıklarını yerleştiren ve bu açıklıkları görselleştiren ikinci aşamasını temsil etmektedir. Bu bölüm, daha önce tanımlanmış olan bina kabuğu yüzeylerine göre yönelim bazlı pencere yerleşim stratejilerini uygular ve görsel doğrulama için gerekli veri üretimini sağlar.

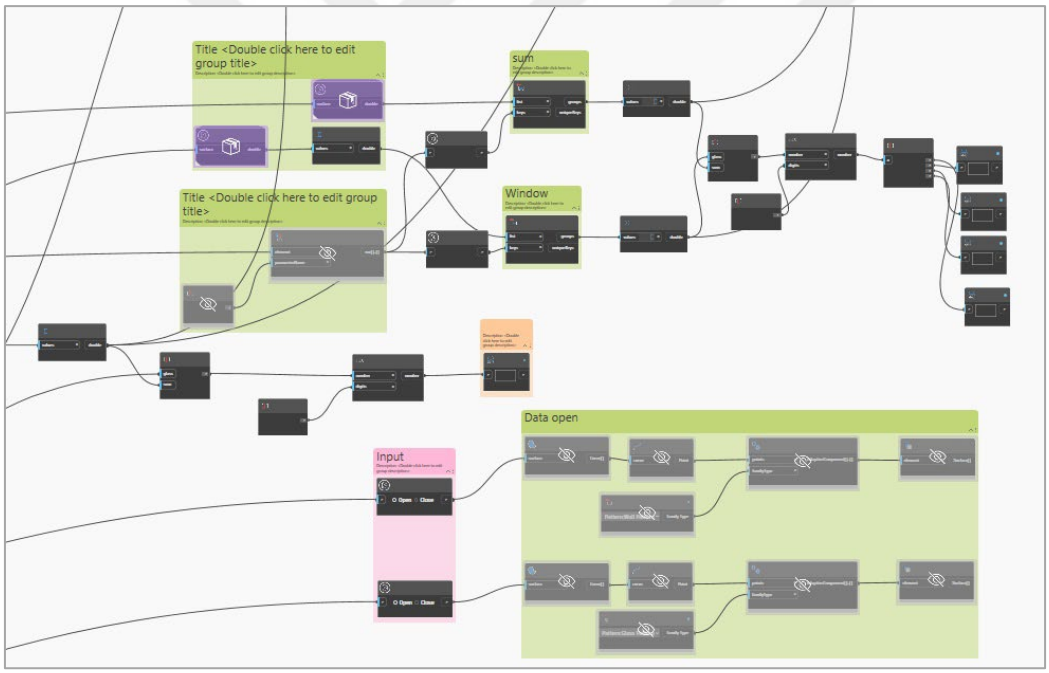
Sol kısımda yer alan "Lower" ve "Upper" olarak etiketlenmiş node grupları, pencere açıklıklarının alt ve üst kotlarını belirlemeye yönelik parametreleri işlemektedir. Bu yükseklikler, parapet yüksekliği ve pencere üst kotu gibi kullanıcı tanımlı verilerle ilişkilendirilmiştir. Tanımlanan bu yükseklik aralıkları, cephe yüzeyine dik doğrultuda oluşturulacak pencere geometrisinin sınırlarını belirler.

Orta alanda yer alan node dizileri, tanımlı yükseklik aralığına göre her cephede oluşturulacak dikdörtgen açıklıkları parametrik olarak üretmektedir. Bu açıklıklar, cephe yönüne bağlı olarak X, Y veya Z düzleminde konumlandırılır. Aynı zamanda, her bir yüzey için pencere

genişliği de kullanıcı girdileriyle belirlenir. Oluşturulan geometriler, cephe yüzeylerine yerleştirilecek şekilde hizalanır.

Algoritmanın sağ alt bölümünde yer alan turkuaz renkli “Visualization” modülleri, oluşturulan pencere geometrilerinin Dynamo’nun Arka Plan Önizleme (Background Preview) penceresinde renklendirilmesini sağlar. Bu sayede kullanıcı, algoritmanın ürettiği tasarımın görsel çıktısını anlık olarak kontrol edebilir. Bu adım özellikle, modeldeki doğrulama ve simülasyon öncesi görsel inceleme açısından büyük önem taşır.

Bu modül, tasarım varyantlarının otomatik olarak üretilmesi kadar, bu varyantların görselleştirilmesini de sağladığından, hem üretken tasarım sürecinin hem de kullanıcıyla etkileşimin kalitesini artırmaktadır.



Şekil 4.8. Yapı kabuğu bileşenlerinin Dynamo ortamında geometrik olarak tanımlanması, sınıflandırılması ve enerji analizine uygun biçimde işlenmesi süreci

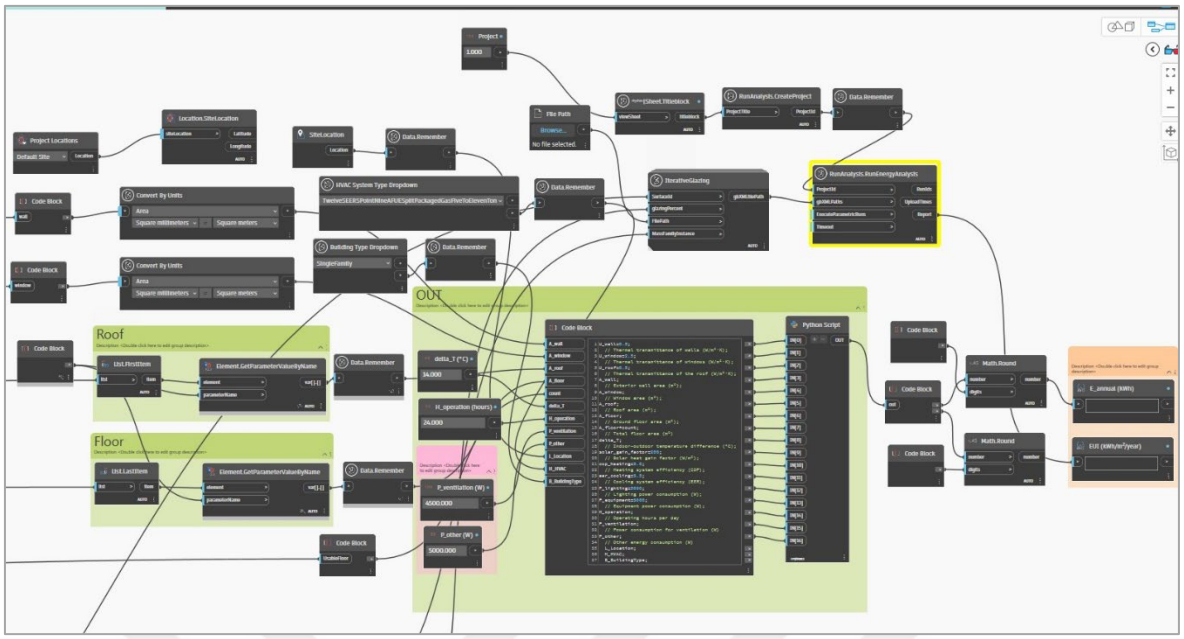
Bu çalışmada enerji performansı analizlerinin güvenilir ve otomasyon destekli şekilde gerçekleştirilebilmesi için öncelikle tasarıma ait geometrik verilerin yapı bileşenlerine göre sistematik biçimde ayrıştırılması gerekmektedir. Bu amaçla, Revit ortamında oluşturulmuş yapı modeline ait fiziksel elemanlar, Dynamo aracılığıyla tanımlanarak kategorik olarak işlenmiştir.

İlgili algoritma şekil 4.8’de , yapı kabuğunu oluşturan temel bileşenleri (örneğin duvar, pencere) otomatik olarak tanımlamakta ve her bir bileşen grubunu, parametrik hesaplama sürecine uygun olacak şekilde gruplandırmaktadır. Bu sınıflandırma süreci, eleman türlerinin tanımlanması, her elemanın fiziksel parametrelerinin okunması ve veri filtreleme işlemleriyle gerçekleştirilmiştir.

Algoritmanın bu aşamasında, yapıya ait tüm pencere yüzeyleri modellenmiş veri üzerinden belirlenerek toplanmış ve toplam pencere alanı hesaplanmıştır. Aynı yöntemle, duvar ve zemin ve çatı gibi diğer yapı bileşenleri de değerlendirilerek daha sonra kullanılacak enerji hesabı bileşenlerine aktarılmak üzere hazırlanmıştır. Bu sistematik ayrıştırma, yapı elemanlarının termal performansa etkisini hesaplamak için gerekli olan yüzey alanlarının doğru şekilde elde edilmesini sağlar.

Ek olarak veri işleme sürecinde tanımlanan her elemanın hem kategorik hem de geometrik yapısı görsel olarak denetlenmiştir. Bu sayede, tasarımdaki olası modelleme hataları veya eksik tanımlamalar analiz süreci öncesinde tespit edilebilmektedir.

Bu ön işleme süreci, enerji simülasyonlarının güvenilirliğini doğrudan etkileyen geometrik doğruluk, yüzey sınıflandırması ve veri bütünlüğü açısından kritik bir adımdır. Böylelikle, her varyasyon için yapının farklı bileşenlerinin yüzey oranları ve alanları doğru şekilde enerji hesaplama süreçlerine entegre edilmektedir.



Şekil 4.9. Önerilen algoritma kapsamında Dynamo ve Green Building Studio destekli enerji simülasyon süreci

Şekil 4.9'da gösterilen algoritmada orta ve sağ bölümlerinde, üretilen her bir tasarım varyasyonu için kapsamlı enerji performansı analizleri gerçekleştirilmektedir. Bu analizler kapsamında, yapı kabuğunu oluşturan duvar, pencere, çatı ve zemin bileşenlerine ilişkin alan ve ısı geçirgenlik katsayısı (U-değeri) parametreler dikkate alınarak, yapının toplam ısıtma ve soğutma yükleri ile yıllık termal enerji gereksinimleri hesaplanmaktadır. Hesaplamalar sırasında, iç-dış ortam sıcaklık farkı ve sistemlerin yıllık çalışma süreleri sabit girdiler olarak tanımlanmakta; ayrıca havalandırma sistemleri ve diğer içsel enerji yükleri de enerji tüketimine dahil edilmektedir.

Orta kısımda yer alan Python betiği, tüm bu parametreleri bir araya getirerek, yıllık toplam enerji tüketimini (kWh) ve bu tüketimin brüt zemin alanına oranlanmasıyla elde edilen enerji kullanım yoğunluğunu (Energy Use Intensity – EUI; kWh/m².yıl) hesaplamaktadır. Bu hesaplamalar parametrik bir yapıdadır; yani kullanıcı tarafından oluşturulan her yeni tasarım varyasyonu için bu analizler dinamik olarak yeniden gerçekleştirilir.

Sürecin devamında, analiz sonuçları sağ bölümde görselleştirilmekte ve kullanıcıya anlaşılır biçimde sunulmaktadır. Elde edilen enerji performansı göstergeleri, belirli bir ondalık hassasiyette yuvarlanarak, tasarımların enerji verimliliği açısından karşılaştırılabilirliğini sağlamaktadır.

Bu analiz altyapısı, Revit ortamında parametrik olarak tanımlanan geometrik bilgilerin gbXML (Green Building XML) formatına dönüştürülmesi ile daha da entegre bir hale gelmektedir. gbXML formatı, Autodesk Green Building Studio (GBS) yazılımına aktarılabilmektedir. GBS platformu, aktarılan model verilerini bulunduğu coğrafi konumun iklim verileri ile birlikte değerlendirerek enerji simülasyonlarını gerçekleştirmekte ve tasarım varyasyonlarının her biri için spesifik enerji kullanım yoğunluğu (EUI) değerlerini hesaplamaktadır.

Bu bütünleşik sistem sayesinde, farklı geometrik konfigürasyonların enerji performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmekte ve erken tasarım aşamasında enerji verimli çözümler üretilmesine olanak sağlanmaktadır. Böylece, sürdürülebilir bina tasarımı hedeflerine yönelik veri odaklı karar destek mekanizmaları geliştirilmiş olmaktadır.

Algoritmanın çıktıları, en uygun varyasyonun grafiksel olarak görselleştirildiği bir analiz paneli aracılığıyla sunulmakta ve bu verilerin Revit ortamına otomatik olarak aktarımı sağlanmaktadır. Kullanıcı, seçilen optimum çözümü hem sayısal performans verileri hem de geometrik özellikler açısından bütüncül olarak değerlendirme imkânına sahiptir. Bu entegrasyon sayesinde, tasarım süreci yalnızca görsel estetik değil, aynı zamanda enerji performansı temelli kriterlerle de yönlendirilmekte; böylece veri destekli ve bütünleşik bir karar verme süreci gerçekleştirilmiş olmaktadır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, geliştirilen algoritmanın yüksek enerji performansına sahip bina tasarımı sürecinde nasıl işlediği ayrıntılı olarak açıklanmakta ve süreç içerisindeki rolü sistematik biçimde ortaya konulmaktadır. İlk olarak, algoritmanın üretken tasarım yaklaşımıyla entegrasyonu ve BIM tabanlı enerji modelleme araçlarıyla etkileşimi ele alınarak, tasarım alternatiflerinin oluşturulma ve değerlendirilme süreci tanımlanacaktır. Ardından, elde edilen enerji simülasyonu çıktılarının doğruluğunu test etmeye yönelik olarak gerçekleştirilen karşılaştırmalı analiz süreci sunulacak ve önerilen yöntemin güvenilirliğine ilişkin bulgular değerlendirilecektir.

5.1. Üretken Tasarım Algoritmasının İşleyişi ve Uygulama Süreci

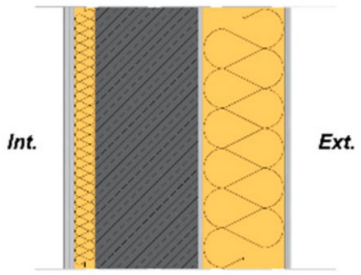
Çizelge 5.1'de, geliştirilen üretken tasarım algoritmasının çalıştırılabilmesi için tanımlanan giriş parametrelerini ve bu parametrelere ait minimum ve maksimum değer aralıklarını göstermektedir. Enerji kullanımı yoğunluğu (EUI), kat alanı, yapı elemanlarının ısı iletim katsayıları (U değerleri), pencere boşluk oranları, kat sayısı ve kat yüksekliği gibi bina geometrisi ve fiziksel özelliklerine ilişkin parametreler detaylı şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca, güneş kazancı faktörü, WWR (Window-to-Wall Ratio), aydınlatma gücü ve cihaz gücü gibi enerji performansını etkileyen çevresel ve sistemsel değişkenler de yer almaktadır. Bu veriler, algoritmanın arama alanını sınırlandırmakta ve optimize edilmiş tasarım çözümlerinin üretilebilmesi için gerekli olan sayısal girdileri oluşturmaktadır. Bu sayede, hem tasarım varyasyonlarının geçerliliği sağlanmakta hem de enerji simülasyonlarının güvenilirliği artırılmaktadır. Ayriyeten bu çalışmada, Ankara şehrinde bulunan 4 katlı konut binasına odaklanıyor.

Çizelge 5.1. Önerilen algoritma için tanımlanan giriş parametreleri ve değer aralıkları

Parametreler	Birim	Min	Max	Parametreler	Birim	Min	Max
EUI hedefi	kWh/m²	80	120	Kat sayısı	-		4
Kat Alanı	m²	200	300	Yükseklik	m	3	3,6
Her kattan üst pencere boşluğu	m	0,6	0,8	WWR	%	10	50
Her kattan alt pencere boşluğu							
Binanın zemin katından boşluk	m	0,6	0,8	Güneş kazanç faktörü	W/m²	180	200
Binanın çatısından boşluk							
Aydınlatma gücü	W	4500	5000	Cihaz gücü	W	2800	3000

Çalışmada kullanılan bina kabuğu bileşenleri, Pasif Ev Enstitüsü'nün yüksek performanslı ısı yalıtımı kriterlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Dış duvarlar, çok katmanlı bir yapı sistemine sahip olup, her katmanın termal özellikleri ve malzeme yapısı Çizelge 5.2'de detaylandırılmıştır. ISO 6946 standardına göre hesaplanan dış duvarın ısı iletim katsayısı (U-değeri), U = 0,13 W/m²K olarak belirlenmiştir. Bu değer, soğuk ve kuru iklim koşullarında enerji kayıplarını en aza indirecek niteliktedir. Pencereler içinse U = 0,85 W/m²K ısı geçirgenlik katsayısı esas alınmıştır. Bu pencere performans değeri, yüksek yalıtım sağlayarak bina genelinde enerji verimliliğini artırmaya katkı sağlamaktadır.

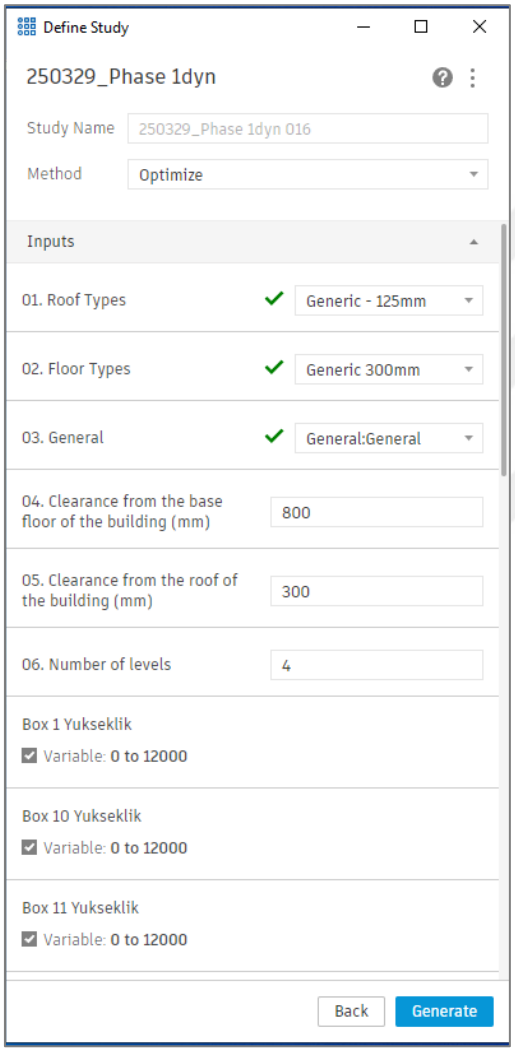
Çizelge 5.2. Dış duvarın termal özellikleri

Duvar	Katmanlar	Kalınlık (mm)	Isı İletkenliği [W/(m·K)]
	İç yüzey kaplaması (sıva)	10	0,8
	Alçı elyaf levha	25	0,36
	Isı yalıtımı (taş yünü)	50	0,033
	Beton duvar	250	2,3
	Yapıştırıcı	10	0,16
	Isı yalıtımı (taş yünü)	200	0,035
	Astar kat (ilk kat sıva)	6	0,16
	Dış yüzey kaplaması (sıva)	10	0,8

Bu çalışmada, üretken tasarım algoritmasının enerji performansı çıktıları üzerindeki etkisini yalın ve doğrudan bir biçimde analiz edebilmek amacıyla, bina plan düzeni tek bir açık alan (open plan) olacak şekilde sabit varsayılmıştır. Böylece farklı cephe varyasyonlarının (örneğin pencere boyutları, açıklık oranları ve yerleşim stratejileri) enerji kullanım yoğunluğu üzerindeki etkisi izole biçimde incelenebilmiştir. Plan düzeyinde sabitlik sağlanarak, enerji performansındaki değişimlerin yalnızca dış kabuk parametrelerine (form ve cephe) bağlı olduğu kabul edilmiştir. Bu varsayım, algoritmanın doğruluk düzeyinin daha kontrollü bir ortamda değerlendirilmesine olanak tanımış; ancak aynı zamanda iç mekân organizasyonunun enerji simülasyonu üzerindeki etkisinin göz ardı edildiği anlamına gelmektedir. İlerleyen çalışmalarda, plan düzeninin farklı tipolojilerle çeşitlendirilmesi bu sınırlılığın aşılmasını sağlayacaktır.

İlk aşamada tanımlanan parametrik girişler doğrultusunda algoritma toplamda 4096 farklı bina formu alternatifi üretebilmektedir. Ancak bu geniş çözüm uzayı, belirlenen tasarım kısıtlamaları çerçevesinde daraltılarak enerji etkinliği açısından en uygun çözümlerin

seçilmesi hedeflenmiştir. Uygulanan kısıtlamalar kapsamında, minimum biçim faktörüne (form faktörü) ve maksimum kat alanına sahip alternatifler öncelikli olarak değerlendirilmiş; böylece ön eleme süreci sonucunda yalnızca 10 adet form, enerji performansı açısından analiz edilmeye uygun bulunmuştur. Bu yöntem, tasarım alternatiflerinin daha verimli bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak, hesaplama kaynaklarının etkin kullanımını ve erken tasarım aşamasında daha isabetli kararların alınmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 5.1. Önerilen sürecin ilk aşamasında Üretken Tasarım uygulamasına ait giriş parametrelerinin tanımlandığı arayüz

Şekil 5.1'de, Autodesk Revit ortamında Dynamo ile geliştirilen üretken tasarım algoritmasının ilk fazına ait parametrik giriş verileri ve kontrol seçenekleri sunulmaktadır. "Optimize" yöntemi seçilerek başlatılan bu süreçte, geometrik varyasyonlar üzerinden enerji etkin bina formlarının oluşturulması hedeflenmiştir. Arayüzde tanımlanan parametreler şu şekildedir:

1. Yapı Elemanları (Roof Types, Floor Types, General): Tasarım sürecine dahil edilecek çatı, döşeme ve genel yapı bileşenlerinin türleri, Revit aileleri (families) üzerinden seçilmiştir. Bu seçimler, oluşturulacak kütlelerin yapısal kurgusunu doğrudan etkilemektedir.

2. Zemin ve Çatıdan Mesafeler (Clearance from the Base Floor/Roof): Bina kütlesinin zemin kotundan itibaren 800 mm ve çatı kotundan itibaren 300 mm boşluk bırakılarak konumlandırılması, tasarımın fiziksel yerleşimi ve çeperler arası mesafelerin kontrolü açısından önemlidir.

3. Kat Sayısı (Number of Levels): Önerilen tasarım senaryosunda yapı dört katlı olarak tanımlanmıştır. Bu parametre, üretken tasarım sürecinde üretilecek alternatif kütlelerin katmanlı yapısını belirlemesi açısından önemlidir. Kat sayısı, hem iç mekân organizasyonunu hem de cephe düzenini etkileyerek enerji performansı üzerinde doğrudan rol oynar. Kullanıcı tarafından değiştirilebilir olarak tanımlanmış bu veri, farklı yükseklik senaryolarının denenmesine olanak tanımaktadır.

4. Kütle Yükseklikleri (Box Heights): “Box 1” den “Box 12” ye kadar tanımlanan her bir anaform, yapı kütlesinin düşeydeki geometrik bileşenlerini temsil etmekte olup, bu elemanlara ait yükseklik değerleri 0 ila 12.000 mm arasında değişken olarak tanımlanmıştır. Bu parametreler, üretken tasarım algoritması kapsamında yapı formunun düşey yöndeki morfolojik varyasyonlarını üretmek amacıyla sisteme giriş verisi olarak dahil edilmiştir. Her bir kütle elemanı, biçimsel çeşitliliğin kontrolünü sağlayan birer modül olarak değerlendirilmekte ve bu sayede parametrik model, çok sayıda hacimsel kombinasyon oluşturabilecek şekilde esnek hale getirilmektedir. Söz konusu parametreler aynı zamanda biçim grameri kuralları çerçevesinde tanımlanmış olup, tasarım alanındaki dönüşüm ve yerleşim kurallarını yöneten birer biçimsel karar değişkeni işlevi görmektedir. Böylece sistematik varyasyonlar aracılığıyla hem işlevsel hem de enerji açısından optimize edilmiş alternatif kütle kompozisyonları elde edilebilmektedir.

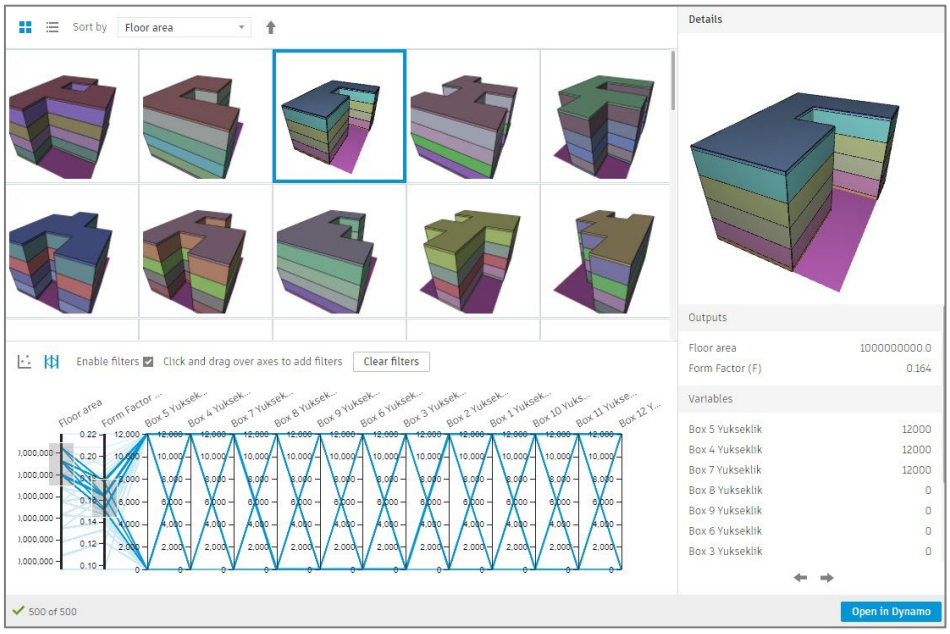
Bu parametre yapısı, üretken tasarım sürecine esnek, kontrol edilebilir ve hedef odaklı bir biçim kazandırmakta; kullanıcıya çok sayıda alternatif üretme olanağı sunarken, bu alternatiflerin önceden belirlenen enerji performansı kriterlerine göre analiz edilmesini

mümkün kılmaktadır. Böylece, erken tasarım aşamasında çoklu çözüm alanı oluşturularak enerji etkin bina tasarımı yönünde karar destek altyapısı sağlanmaktadır.



Şekil 5.2. Üretken tasarımda önerilen algoritmanın ilk aşaması için gelişmiş nesil ayarları

Üretken Tasarımsüreci, Autodesk Revit yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tasarım seçeneklerinin üretiminde genetik algoritma kullanılmış olup, algoritmanın başlangıç parametreleri şekil 5.2'de gösterildiği gibi bu şekilde tanımlanmıştır: popülasyon büyüklüğü 100, jenerasyon sayısı 20 ve başlangıç rastgelelik değeri (seed) 1 olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, çözüm uzayında yeterli çeşitliliğin sağlanması ve farklı tasarım olasılıklarının keşfedilmesi amacıyla seçilmiştir.



Şekil 5.3. Üretken tasarım sürecinde elde edilen bina kütlelerinin biçim faktörü ve kat alanına göre görsel ve sayısal analizi

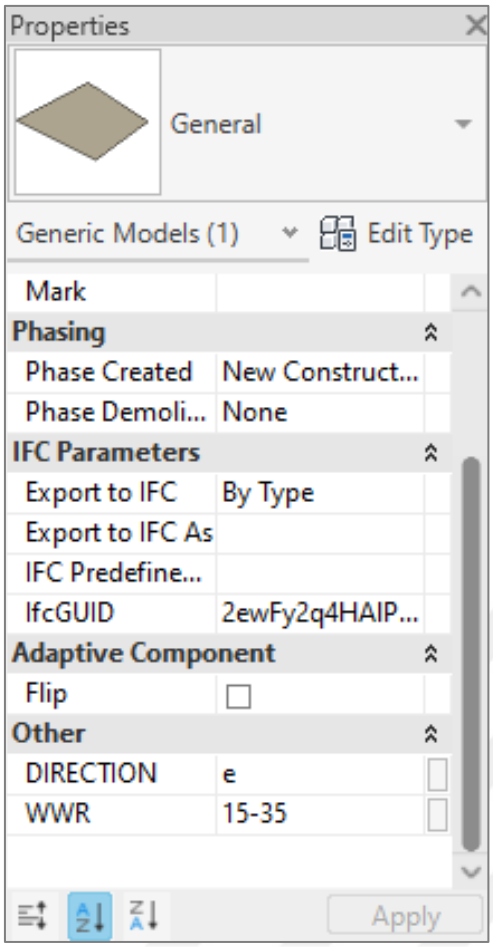
Söz konusu arayüz, üretken tasarım sürecinde elde edilen alternatif bina kütlelerinin şekil 5ç3'te ki gibi hem görsel hem de sayısal biçimde karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Her bir varyasyon, biçim faktörü ve kat alanı gibi performans göstergeleri temelinde analiz edilmekte; böylece önceden tanımlanmış kriterlere (örneğin, düşük biçim faktörü ve maksimum kat alanı) uygun çözümlerin sistematik biçimde seçilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu sayede tasarım süreci, sezgisel yaklaşımların ötesine geçerek veriye dayalı, hızlı ve optimize edilmiş kararların alınabildiği bir yapıya kavuşmaktadır. Seçilen çözümlerin görsel olarak izlenebilmesi ve doğrudan BIM ortamına (Revit) entegre edilebilmesi, bütünleşik ve performans odaklı bir tasarım yaklaşımını desteklemektedir.

İkinci aşamada, birinci algoritma aracılığıyla seçilen uygun bina formu, ikinci algoritmaya entegre edilerek cephe tasarımı detaylandırılmıştır. Bu kapsamda, her cepheye yönelik pencere konumları ve açıklık alanları tanımlanmış; cephe bazında WWR (Pencere-Duvar Oranı) değerleri uygulanmıştır. İlgili oranlar, ulusal standartlar (TS 825, BEP Yönetmeliği) ve güncel literatürdeki soğuk-kuru iklim koşullarına yönelik enerji verimliliği kriterleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Çizelge 5.3, cephe yönlerine göre önerilen WWR aralıklarını sunmakta ve algoritmanın karar parametrelerinin dayandığı referans değerleri özetlemektedir.

Çizelge 5.3. Soğuk-kuru iklim koşullarına uygun WWR değerleri

Cephe Yönü	WWR	Cephe Yönü	WWR
Kuzey	%10 – %25	Doğu	%15 – %35
Güney	%30 – %60	Batı	%15 – %35

Revit ortamında tanımlanan veri seti kapsamında, her bir bina cephesi için opak (duvar) ve saydam (cam) yüzey oranlarının ayrı ayrı belirlenmesi gerekmektedir. Bu oranlar, bina kabuğunun enerji performansını doğrudan etkileyen kritik parametreler arasında yer almakta olup, tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Kullanıcı tarafından manuel olarak tanımlanması gereken bu oranlar, hem yönelime bağlı olarak güneş ışınımı kazanımları hem de ısı kayıpları açısından parametrik analizlerde hassasiyetle dikkate alınmalıdır. Bu süreç, üretken tasarım algoritmalarının farklı cephe senaryoları üzerinden performans optimizasyonu yapabilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 5.4. Revit ortamında cepheye ait yön ve pencere/duvar oranı (WWR) parametrelerinin tanımlanması

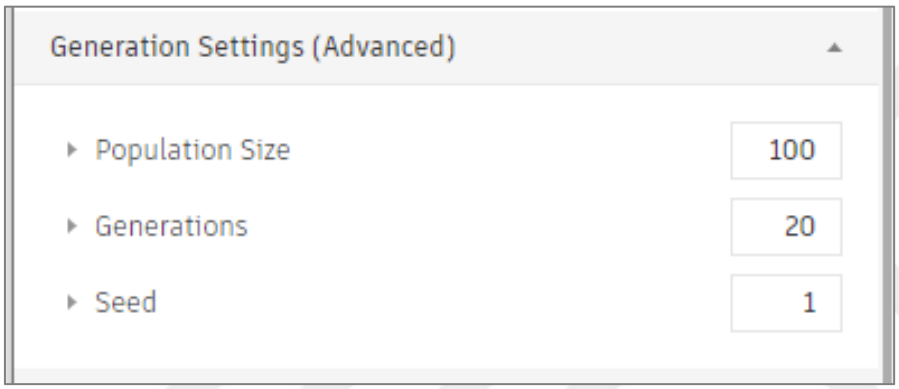
Şekil 5.4'te, Revit ortamında tanımlanmış bir "Generic Model" bileşenine ait özellikler paneli yer almaktadır. Parametrik enerji simülasyonlarına temel teşkil eden bu panel, kullanıcı tarafından tanımlanması gereken iki kritik tasarım verisini içermektedir:

1. DIRECTION (Cephe Yönelimi): İlgili yüzeyin coğrafi yönünü (örneğin, doğu – e) belirtir. Yön bilgisi, cepheye gelen güneş ışınımının yön, zaman ve şiddetine bağlı olarak değişmesi sebebiyle, binanın ısıl konforu ve enerji tüketimi üzerinde doğrudan belirleyici bir role sahiptir. Bu nedenle doğru ve detaylı yön tanımı, enerji performansı analizlerinin güvenilirliği açısından elzemdir.

2. WWR (Window-to-Wall Ratio – Opaklık/Saydamlık Oranı): Cephe yüzeyinde şeffaf (cam) alanların, toplam yüzey alanına oranını ifade eder. Bu parametre, görselde %15 ile %35 arasında değiştirilebilir bir aralıkta kullanıcı tarafından tanımlanmıştır. Tanımlanan bu

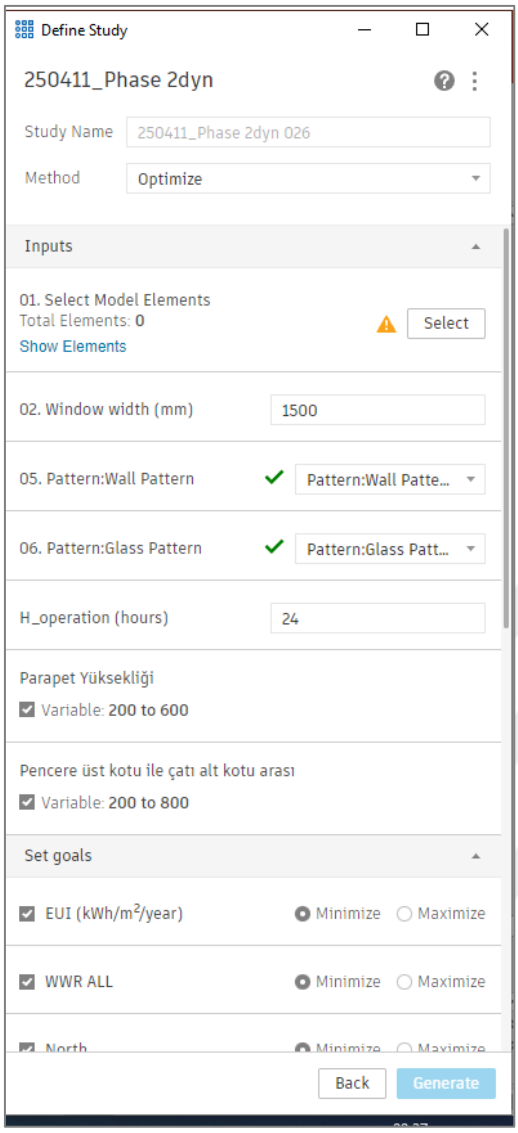
varyasyon aralığı, üretken tasarım algoritması kapsamında farklı pencere boyutlarının bina enerji performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Bu parametrelerin her biri, üretken tasarım sürecine entegre edilen Dynamo ve Autodesk Refinery araçlarıyla etkileşimli biçimde işlenebilmekte; böylece cephe bazlı, optimize edilmiş enerji simülasyonları gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Tanımlanan bu veri yapısı, Revit modeli ile bina enerji modeli (BEM) arasında anlamlı ve kontrollü bir veri aktarımı sağlayarak, enerji etkin tasarım sürecinin erken aşamalarında karar destek mekanizması olarak işlev görmektedir.



Şekil 5.5. Üretken tasarımda önerilen algoritmanın ikinci aşaması için gelişmiş nesil ayarları

Üretken Tasarımsüreci, Autodesk Revit yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tasarım seçeneklerinin üretiminde genetik algoritma kullanılmış olup, algoritmanın başlangıç parametreleri şekil 5.5'te sunulduğu gibi tanımlanmıştır: popülasyon büyüklüğü 100, jenerasyon sayısı 20 ve başlangıç rastgelelik değeri (seed) 1 olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, çözüm uzayında yeterli çeşitliliğin sağlanması ve farklı tasarım olasılıklarının keşfedilmesi amacıyla seçilmiştir.



Şekil 5.6. Üretken Tasarımarayüzünde giriş veriler

Şekil 5.6'da, Autodesk Revit yazılımı içerisinde Dynamo entegrasyonu ile çalışan Üretken Tasarım modülüne ait "Define Study" (Çalışma Tanımlama) arayüzünü göstermektedir. Bu arayüz, üretken tasarım sürecinin başlangıç aşamasında kritik öneme sahip olan parametrik girdilerin, varyasyon aralıklarının ve optimizasyon hedeflerinin sistematik biçimde tanımlanmasına olanak tanır. Bu çalışmada önerilen algoritmalar ile mimari tasarımın erken evresinde kullanılan bu modül sayesinde kullanıcı, enerji performansı gibi sayısal kriterlere dayalı olarak çok sayıda kütle ve cephe tasarım alternatifi üretebilir ve bu alternatifleri belirlenen hedef fonksiyonlara göre değerlendirebilir.

"Define Study" paneli, kullanıcıya tasarıma ait geometri, malzeme özelliği, açıklık yerleşimi, kullanım süresi gibi çok boyutlu değişkenleri tanımlayarak, algoritmik süreçlerin

yönetilmesini sağlar. Aynı zamanda, optimizasyon metodunun (örneğin “Optimize”, “Randomize” veya “Cross Product”) seçilmesine imkân vererek, tasarım sürecinin hem yönünü hem de derinliğini kullanıcıya göre uyarlama esnekliği sunar. Bu yönüyle, üretken tasarımın sadece biçimsel çeşitlilik sağlamakla kalmayıp, performans temelli karar destek aracı olarak da işlev gördüğü söylenebilir. Dolayısıyla bu arayüz, enerji etkin mimari tasarım hedefleyen çalışmalarda, yapı kabuğuna ait parametrelerin kontrol edilebilir ve karşılaştırılabilir biçimde işlenmesini mümkün kılan önemli bir tasarım bileşenidir.

Şekil 5.6’da tanımlanması gereken parametreler ile kullanıcı tarafından girilmesi gereken verilere ilişkin detaylar aşağıda açıklanmıştır.

1. Study Name (Çalışma Adı): Çalışma için sistem tarafından otomatik olarak atanan veya kullanıcı tarafından belirlenen isimdir. Bu isim, farklı varyasyonların arşivlenmesi ve karşılaştırılması açısından önemlidir.

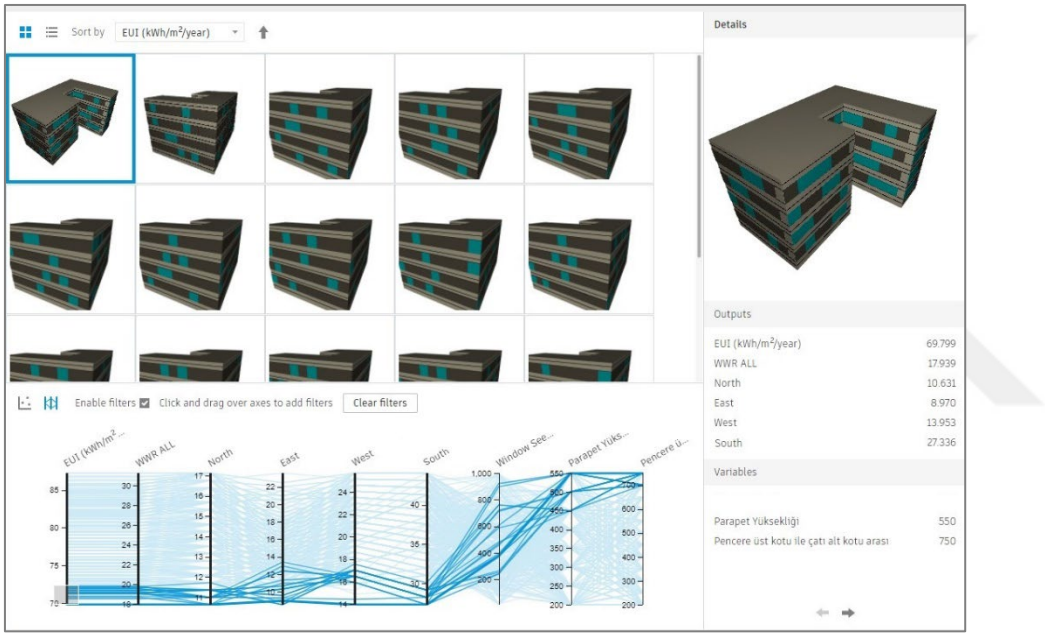
2. Method (Yöntem): "Optimize" seçeneği seçilmiştir. Bu yöntem, tanımlanan hedeflere göre en uygun tasarım alternatiflerini belirlemek üzere algoritmik optimizasyon süreci başlatır.

3. Inputs (Girdi Parametreleri): Bu bölüm, tasarım sürecinde değişken olarak tanımlanan ve üretilecek alternatiflerde çeşitliliği sağlayacak parametreleri içerir:

- Select Model Elements: Modelde çalışmaya dahil edilecek fiziksel bileşenlerin seçilmesi gerekir. Henüz seçim yapılmadığı için uyarı simgesi gösterilmiştir.
- Window Width (mm): Pencere genişliği sabit bir değer (1500 mm) olarak girilmiştir. Bu değer tasarım varyasyonlarında değişken olarak tanımlanmamıştır.
- Pattern: Wall Pattern ve Glass Pattern: Duvar ve cam yüzeylere uygulanacak desenler seçilmiş ve parametreleştirilmiştir. Bu, cephe tasarımında estetik ve performans kriterlerinin birlikte ele alınmasını sağlar.
- H_operation (hours): Binanın günlük kullanım süresi 24 saat olarak sabitlenmiştir. Bu veri, enerji simülasyonlarında kullanım profiline etki eder.
- Parapet Yüksekliği: 200 mm ile 600 mm arasında değişken bir parametre olarak tanımlanmıştır. Tasarım varyasyonları bu aralıkta otomatik olarak üretilecektir.

- Pencere üst kotu ile çatı alt kotu arası: Pencere yerleşimi ile çatı sınırı arasındaki düşey mesafe, 200 mm ile 800 mm arasında bir değişken olarak girilmiştir.

Şekil 5.7, optimizasyon süreci sonucunda kullanıcıya sunulan veri çerçevelerini ve arayüzü göstermektedir. Bu arayüzde, farklı cephelerdeki pencere yerleşimleri ve WWR varyasyonları dikkate alınarak tasarımların enerji performansları analiz edilmiştir. Görselde yer alan üç boyutlu (3D) modeller, her biri farklı pencere oranlarına sahip olan farklı tasarım alternatifini temsil etmektedir. Bu sayede kullanıcı, enerji etkinliği açısından alternatif çözümleri görsel olarak karşılaştırma ve değerlendirme imkânına sahip olmaktadır.



Şekil 5.7. Üretken Tasarım süreci sonucunda elde edilen tasarım alternatiflerinin enerji performansı, cephe bazlı WWR değerleri ve geometrik değişkenler ile birlikte görselleştirildiği kullanıcı arayüzü

Her bir alternatif tasarım için; Enerji Kullanım Yoğunluğu (EUI), her cepheye ait Pencere-Alan Oranı (WWR), Toplam WWR, pencere üst kotu ile çatı alt kotu arasındaki mesafe ve parapet yüksekliği gibi verileri hesaplanmakta ve kullanıcıya sunulmaktadır. Kullanıcı, oluşturulan çözümler arasından herhangi birini seçtiğinde bu verilerin tamamını detaylı olarak görüntüleyebilmektedir. Ayrıca sistem, mimarlara tasarım hedeflerine göre sıralama kriterini belirleme esnekliği sağlamaktadır. Verilerin sıralanabilir olması, farklı önceliklere sahip tasarım senaryolarının karşılaştırılmasına olanak tanır. Böylece kullanıcı, kendi kriterlerine en uygun olan çözümü kolayca belirleyebilir. Çizelge 5.4'de, alternatif tasarımlar

EUI değerine göre artan şekilde, yani en düşük EUI değerine sahip çözüm en üstte olacak şekilde sıralanmıştır.

Çizelge 5.4. Revit üretken tasarım arayüzü kullanılarak oluşturulan tasarım alternatiflerinin çıktı verileri

EUI (kWh/m²/Year)	WWR All	North WWR	East WWR	South WWR	West WWR	Parapet Yüksekliği (mm)	Pencere Üst Kotu (mm)
69,799	17,939	10,631	8,970	27,336	13,953	550	750
70,593	18,547	10,991	9,274	28,263	14,426	500	750
70,593	18,687	10,631	10,963	27,336	15,946	550	750
70,930	18,805	10,991	9,274	28,263	16,486	550	700
71,266	19,062	10,991	10,304	28,263	16,486	500	750
71,387	19,155	11,351	8,514	29,189	17,027	450	750
71,426	19,185	10,631	12,956	27,336	15,946	550	750
71,602	19,320	10,991	11,334	28,263	10,486	500	750
71,735	19,421	11,351	9,578	29,189	17,027	450	750
71,939	19,578	10,991	12,365	28,263	16,486	550	700

Veriler incelendiğinde, özellikle güney cephesinde daha yüksek WWR (Window-to-Wall Ratio) değerlerinin uygulandığı görülmektedir. Bu durum, soğuk ve kuru iklim koşullarında pasif ısı kazançlarının artırılması açısından uygun bir tasarım stratejisidir. Diğer yandan, kuzey, doğu ve batı cephelerinde daha düşük WWR değerleri tercih edilerek, ısı kayıplarının sınırlandırılması ve enerji verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, cephe bazlı stratejilerin iklim koşullarına göre optimize edilmesinin enerji performansı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

5.2. Önerilen Algoritmanın Doğruluk Testi

Bu çalışmada geliştirilen algoritma, bina tasarımının erken aşamasında form üretimi ve cephe tasarımı sürecine yönelik bir karar destek aracı olarak yapılandırılmıştır. Geliştirilen sistem iki ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, Biçim Grameri yöntemi kullanılarak çeşitli bina kütleleri (form alternatifleri) otomatik olarak oluşturulmuştur. Bu süreçte, geometrik kurallar ve parametrik ilişkiler aracılığıyla mimari anlam taşıyan form varyasyonları elde edilmiştir.

İkinci aşamada ise, her bir seçilen kütle formu için, dört ana cephe yönünde (kuzey, güney, doğu, batı) farklı Pencere-Duvar Oranı (Window-to-Wall Ratio - WWR) senaryoları oluşturulmuştur. Bu varyasyonlar, belirlenen sınırlar dahilinde algoritmik olarak türetilmiş

ve her bir alternatif model için yıllık enerji performansı değerlendirilmiştir. Enerji performansı hesaplamalarında iklim verileri ve bina kabuğu özellikleri dikkate alınarak bir enerji simülasyon motoru aracılığıyla (Green Building Studio motoru) yıllık enerji kullanım yoğunluğu (Energy Use Intensity - EUI) hesaplanmıştır.

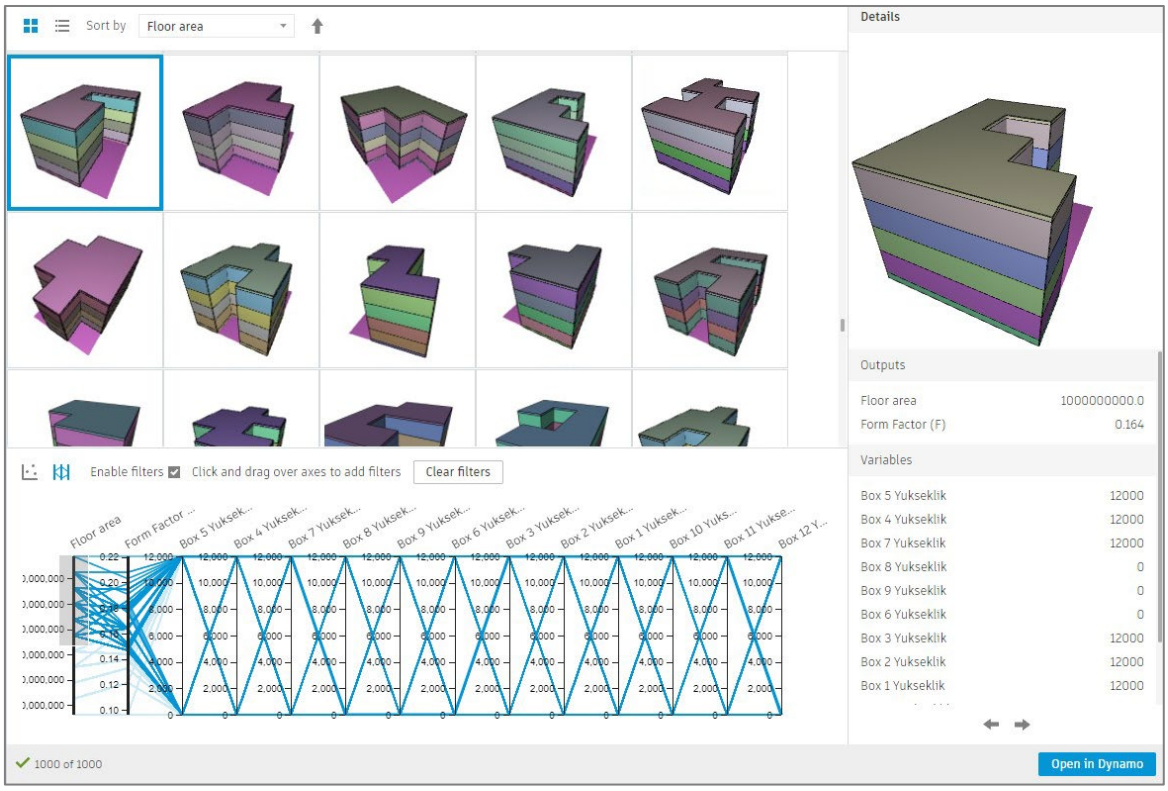
Geliştirilen algoritmanın doğruluğunu test etmek amacıyla, algoritma tarafından üretilen form alternatiflerinden seçilen 10 model üzerinde detaylı bir karşılaştırma analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz kapsamında, her bir seçilen bina formunun algoritma tarafından önerilen cephe tasarımı (WWR dağılımı) esas alınarak Autodesk Revit yazılımında üç boyutlu modelleri manuel olarak oluşturulmuştur. Ardından, Revit ortamında modellenen bu yapılar, Autodesk Insight Carbon analiz aracı ile enerji simülasyonuna tabi tutulmuş ve her model için yıllık enerji kullanım değerleri yeniden hesaplanmıştır.

Son olarak, algoritma tarafından hesaplanan enerji kullanım değerleri ile Insight Carbon uygulamasından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve algoritmanın simülasyon verileriyle %94,04 oranda örtüştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, geliştirilen algoritmanın form ve cephe varyasyonlarının enerji performansını doğru biçimde öngörebildiğini ve erken tasarım aşamasında geçerli kararlar alınmasına katkı sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

Şekil 5.8'de yer alan ekran görüntüsü, Autodesk Revit yazılımı içerisinde bulunan Üretken Tasarım modülüne ait bir örnek uygulamayı göstermektedir. Bu arayüz, önceden tanımlanmış tasarım hedefleri doğrultusunda çok sayıda bina formunun otomatik olarak üretilmesini ve parametrik kriterlere göre değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Üst bölümde yer alan 3B model penceresi, algoritma tarafından oluşturulan çeşitli bina kütlelerini temsil etmektedir. Sağ taraftaki bilgi panelinde ise, seçilen alternatifin ilgili tasarım çıktıları – örneğin kat alanı (Floor Area) ve biçim faktörü (Form Factor, F) – doğrudan görüntülenebilmektedir. Alt bölümde bulunan paralel koordinatlar diyagramı, tüm varyasyonlara ait parametrelerin eş zamanlı ve karşılaştırmalı olarak görselleştirilmesini sağlar. Bu grafik aracılığıyla parametreler arasındaki ilişkiler analiz edilebilirken, kullanıcılar belirli kriter aralıklarında filtreleme yaparak tasarım seçeneklerini daraltabilmektedir. Bu yaklaşım, çok kriterli karar verme süreçleri için etkin bir tasarım aracı işlevi görmektedir.

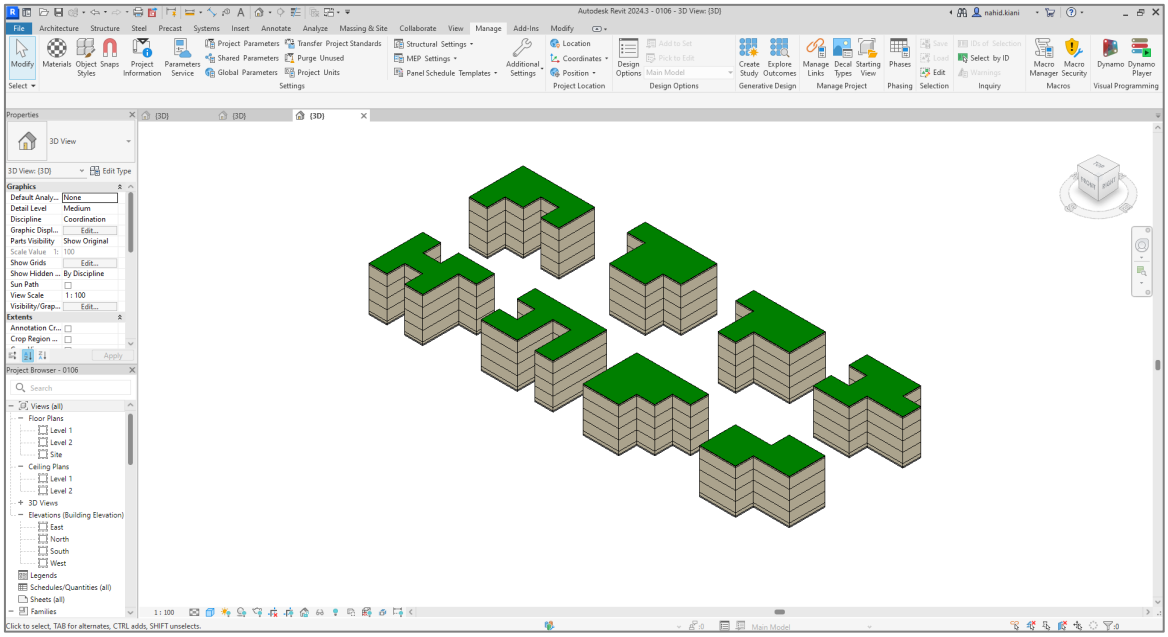
Bu görsel, çalışmada geliştirilen algoritmanın Revit ortamına başarıyla entegre edildiğini ve tasarım alternatiflerinin interaktif olarak analiz edilebildiğini göstermesi açısından önem taşımaktadır. Aynı zamanda, enerji performansı, form geometrisi ve kat alanı gibi kritik değişkenlerin birlikte değerlendirilmesine imkân tanıyarak, erken tasarım aşamasında bilgisayar destekli karar alma süreçlerine somut katkı sağlamaktadır.



Şekil 5.8. Revit Üretken Tasarım arayüzü üzerinden elde edilen kütle alternatifleri

Bu aşamadan itibaren, oluşturulan her bir yapı formu için geliştirilmiş özel bir algoritma aracılığıyla cephe tasarım sürecine geçilmektedir. Söz konusu algoritma, yapının dört ana yönüne (kuzey, güney, doğu ve batı) göre farklı pencere-duvar oranı (Window-to-Wall Ratio – WWR) değerlerini dikkate alarak, çok sayıda alternatif cephe konfigürasyonu üretmektedir. Bu konfigürasyonlar yalnızca WWR oranları üzerinden sınıflandırılmakla kalmamakta, aynı zamanda pencerelerin cephe üzerindeki konumları, boyutları, şekilleri ve dağılım modelleri gibi morfolojik faktörleri de içermektedir. Böylece, sadece açıklık yüzdesi değil, aynı zamanda tasarımın mekânsal niteliğini etkileyen birçok geometrik ve görsel değişken senaryo bazında çeşitlendirilebilmektedir.

Üretilen her bir cephe senaryosu, Autodesk Üretken Tasarım modülü yardımıyla Revit ortamında dijital olarak modellenmekte ve simülasyonlara hazır hale getirilmektedir. Her varyasyon, tanımlanmış iklim verileri ve yapı kabuğu özellikleri doğrultusunda enerji performansı açısından değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, her bir cephe alternatifi için Enerji Kullanım Yoğunluğu (Energy Use Intensity – EUI) değeri hesaplanmakta ve karşılaştırmalı analiz yapılmaktadır. Bu hesaplamalar, iklimsel bağlam, malzeme özellikleri ve yapı geometrisi gibi çok sayıda etkenin bir arada değerlendirilmesini sağlayarak, erken tasarım aşamasında performans odaklı kararların alınmasını mümkün kılan bütüncül bir karar destek mekanizması sunmaktadır.



Şekil 5.9. Üretken Tasarım ortamında seçilen bina kütlelerinin Autodesk Revit'e aktarılmış hali

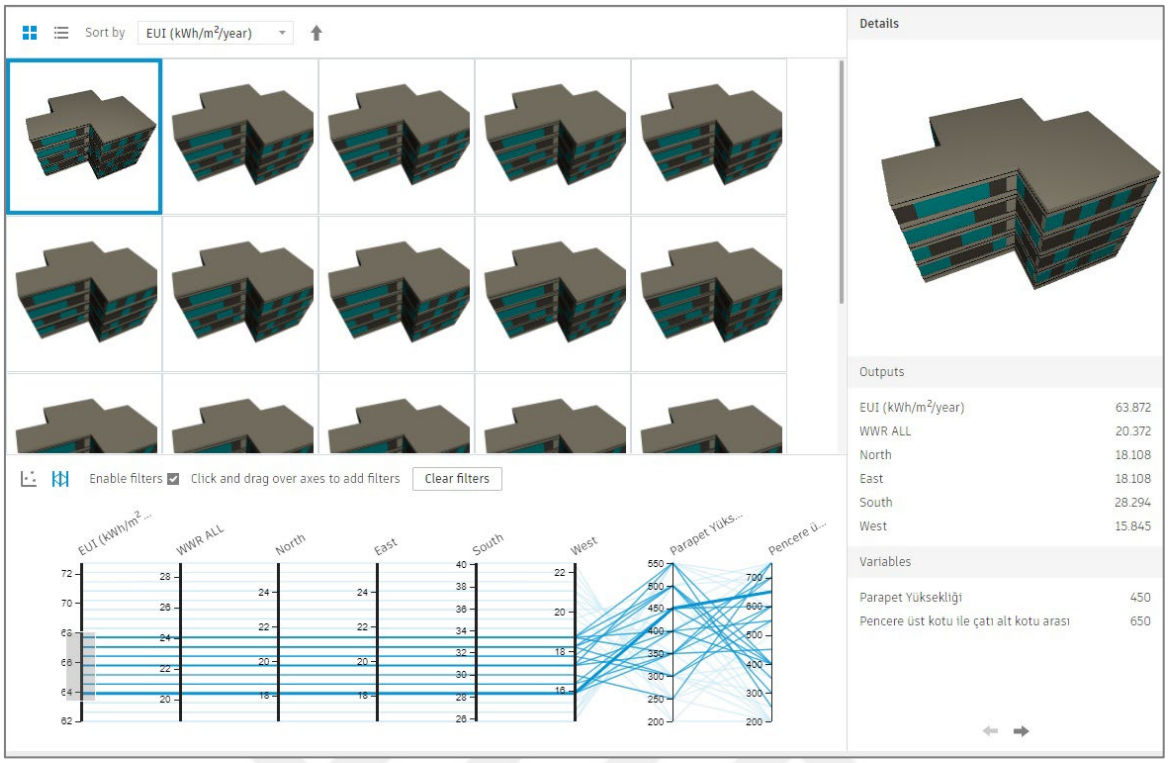
Şekil 5.9'da, Autodesk Revit ortamında yer alan Üretken Tasarım modülünde geliştirilmiş parametrik algoritma aracılığıyla üretilen ilk cephe varyasyonuna ait ekran görüntüsü sunulmaktadır. Bu alternatif tasarım, daha önce tanımlanan bina kütlesi üzerine entegre edilen cephe morfolojisi algoritması doğrultusunda oluşturulmuştur. Algoritma, dört ana cephe yönü (kuzey, güney, doğu, batı) için ayrı ayrı tanımlanabilen pencere-duvar oranı (Window-to-Wall Ratio – WWR), pencere yerleşimi, pencere boyutları ve parapet yüksekliği gibi parametrik değişkenler üzerinden varyasyon üretme kapasitesine sahiptir. Bu parametreler, önceden tanımlanmış sınırlar içerisinde rastlantısal veya hedefe yönelik biçimde çeşitlendirilerek, tasarım senaryoları oluşturulmuştur.

Görselin üst bölümünde yer alan 3B model görselleştirmesi, seçilen varyantın cephe yüzeylerindeki açıklık yerleşimini, pencere boyutlarını ve genel geometrik düzenini görsel olarak sergilemektedir. Bu aşamada, algoritma her cephe yönü için farklı WWR değerleri üretmiş ve tasarım, bu oranlara göre otomatik olarak biçimlenmiştir. Örneğin, bu örnekteki tasarımda, genel pencere-duvar oranı %20.37 olarak hesaplanmıştır. En yüksek açıklık oranı güney cephesinde (%28.29), en düşük açıklık oranı ise doğu cephesinde (%15.84) elde edilmiştir. Bu oranlar, hem iç mekânlara doğal aydınlatma ve ısı kazanımı sağlayacak biçimde hem de iklim verileriyle uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir.

Sağ üst köşede bulunan "Details" paneli, bu alternatif için hesaplanan performans çıktılarının sayısal verilerini içermektedir. Bu çıktılar arasında en dikkat çekici gösterge, yapı kabuğu konfigürasyonunun enerji performansına etkisini ifade eden Enerji Kullanım Yoğunluğu (Energy Use Intensity – EUI) değeridir. Bu alternatifte, EUI değeri 63.87 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Bu değer, binanın yıllık birim alan başına düşen enerji tüketimini ifade etmekte olup, cephe tasarımına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Görselin alt bölümünde yer alan paralel koordinatlar diyagramı, alternatif tasarımın oluşturulmasında rol oynayan parametrelerin (örneğin WWR, parapet yüksekliği, pencere boyutları) birbirleriyle olan ilişkisini ve her bir parametrenin EUI üzerindeki etkisini görsel olarak analiz etmeye olanak tanımaktadır. Bu analiz yöntemi, kullanıcıya hangi parametrelerin enerji performansı üzerinde daha belirleyici olduğunu grafiksel olarak değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bu yapı, geliştirilen algoritmanın yalnızca form üretimi değil, aynı zamanda enerji verimliliği açısından optimize edilebilir alternatifleri tanımlama ve seçme kapasitesini de ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Şekil 5.10'da sunulan görsel; otomatik cephe varyasyonu üretimi, enerji simülasyonu ve performansa dayalı karar verme süreçlerinin bütünleşik olarak uygulanabildiği bir dijital tasarım ortamının örneğini sunmakta, erken tasarım aşamasında parametrik girdilerle enerji performansını etkileyen tasarım kararlarının nasıl optimize edilebileceğini göstermektedir.



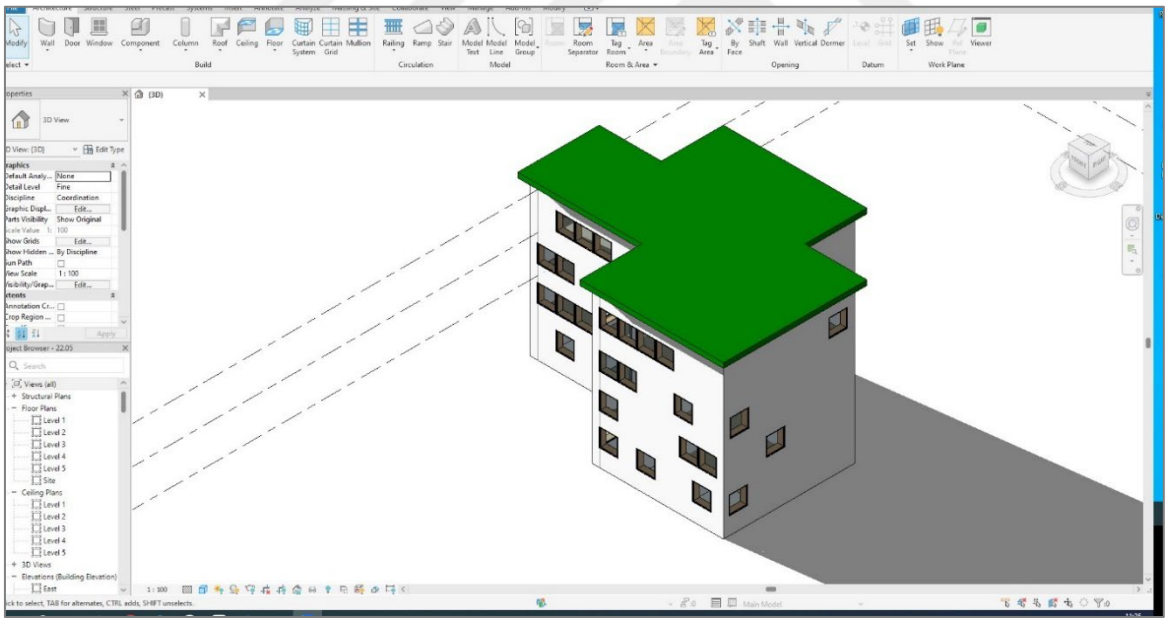
Şekil 5.10. Birinci alternative ait üretilen cephe tasarım alternatifleri, Revit Üretken Tasarımarayüzü ekran görüntüsü

Şekil 5.10'da, üretken tasarım algoritmasıyla oluşturulan cephe tasarım alternatiflerinden birinin, Autodesk Revit ortamında manuel olarak yeniden modellenmiş hali sunulmaktadır. Bu uygulama, algoritmanın üretmiş olduğu parametrik varyasyonların mimari modelleme yazılımında temsil edilebilirliğini ve pratik uygulamaya geçirilebilirliğini test etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, enerji performans analizinde kullanılacak geometrik modelin doğruluk seviyesini artırmak ve simülasyon sonuçlarının güvenilirliğini pekiştirmek hedeflenmiştir.

Görselde yer alan modelde, daha önce üretken tasarım süreciyle belirlenmiş olan pencere-duvar oranları (WWR), her bir cephe yönü için ayrı ayrı dikkate alınarak Revit ortamına aktarılmıştır. Pencerelerin yerleşimleri, boyutları, parapet üst kotları ve düşey konumlandırmaları, algoritma çıktılarından elde edilen değerlere sadık kalınarak manuel olarak modellenmiştir. Özellikle cephe tasarımında güney cephesinin daha yüksek açıklık oranına sahip olacak şekilde düzenlenmesi, pasif güneş kazanımı stratejileri kapsamında enerji verimliliğini artırmaya yönelik bilinçli bir tercihi temsil etmektedir. Bu tasarım kararının arkasında, kış aylarında güneş ışınımından maksimum düzeyde yararlanmak ve ısıtma yükünü azaltmak gibi pasif tasarım ilkeleri yer almaktadır.

Model, dört ana cephe yönü (kuzey, güney, doğu, batı) için farklı açıklık düzenlemelerini içermekte olup, katmanlı yapı ilkesi doğrultusunda her kat için açıklıklar ayrı ayrı tanımlanmıştır. Bu yapı sayesinde, cephe varyasyonları yalnızca yatay düzlemde değil, düşeyde de biçimsel çeşitlilik göstermektedir. Dolayısıyla, algoritmik olarak üretilmiş cephe varyasyonlarının yalnızca sayısal çıktılarla sınırlı kalmayıp, üç boyutlu mimari modelleme ortamına aktarılabilirliği ve detaylandırılabilirliği gösterilmiştir.

Bu manuel yeniden modelleme süreci, bir yandan algoritmanın üretmiş olduğu soyut tasarım varyantlarının gerçek mimari modelleme ortamlarında doğrulanmasını sağlarken; diğer yandan enerji simülasyonu (örneğin Autodesk Insight) gibi performans analiz araçlarına veri sağlayacak olan doğru ve temiz bir geometrik altlık oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Böylece, üretken tasarım süreçleriyle elde edilen sonuçların, geleneksel BIM tabanlı tasarım platformlarıyla entegrasyon potansiyeli artırılmış; parametrik ve simülasyon tabanlı tasarım döngüsü arasında bütünsel bir bağ kurulmuştur.



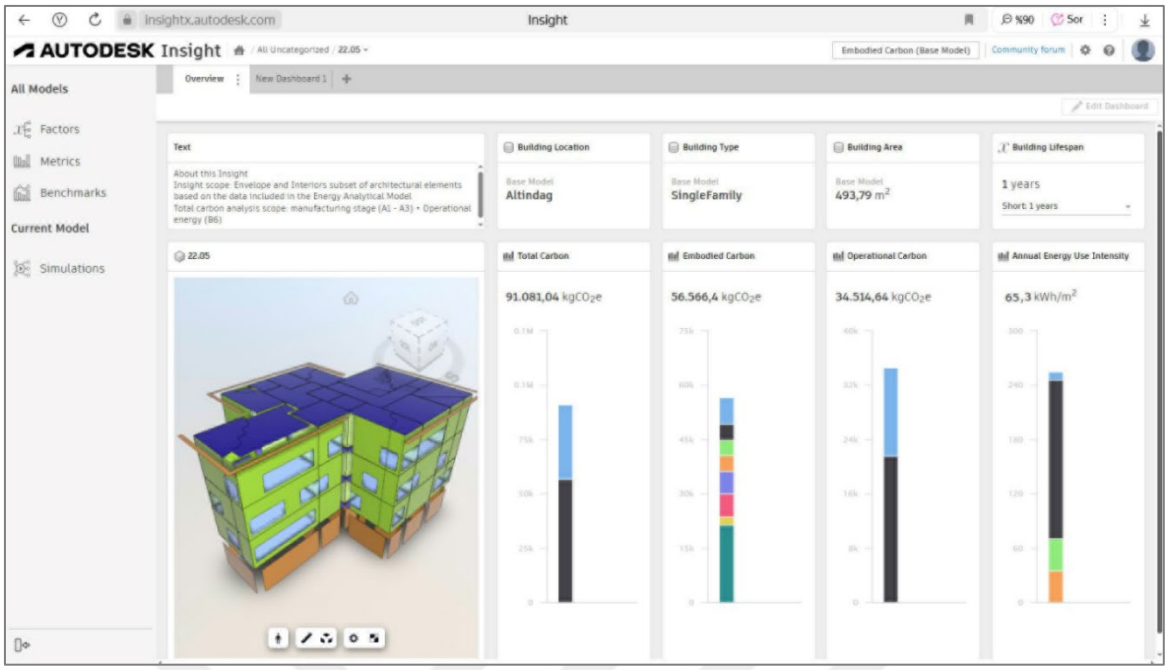
Şekil 5.11. Üretken tasarım algoritmasıyla oluşturulan cephe alternatifinin Autodesk Revit ortamında manuel olarak yeniden modellenmiş hali

Şekil 5.11'de, Autodesk Insight platformu kullanılarak oluşturulan bina enerji performansı analizine ilişkin sonuçlar görselleştirilmektedir. Bu analiz, Revit ortamında daha önce geliştirilen ve cephe varyasyonları tanımlanmış olan bina modeline dayanmakta olup, modelin enerji analitik formu üzerinden gerçekleştirilmiştir. Simülasyon, yalnızca işletme dönemine ait enerji kullanımı (Energy Use Intensity – EUI) değil, aynı zamanda toplam

karbon salımı üzerinden de kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Bu kapsam, hem gömülü karbon (embodied carbon) hem de işletim karbonu (operational carbon) verilerini içermekte ve böylece yapı ömrü süresince çevresel etkilerin bütünsel biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Analiz parametreleri çerçevesinde, modelin coğrafi konumu Altındağ/Ankara olarak belirlenmiş; yapı konut fonksiyonlu bina türü kapsamında sınıflandırılmıştır. Yapının toplam kullanım alanı 493,79 m² olarak tanımlanmıştır. Değerlendirme süreci, yapının 1 yıllık bir yaşam döngüsünü esas alarak gerçekleştirilmiş, bu sayede karbon emisyonu çıktılarının yıllık bazda karşılaştırılabilir olması hedeflenmiştir. Bu kısıtlı süreli değerlendirme, özellikle erken tasarım aşamasında farklı cephe varyasyonlarının çevresel etkilerini birbirine oranla ölçülebilir kılmak adına tercih edilmiştir.

Insight platformu, bu simülasyon kapsamında, kullanıcı tanımlı pencere-duvar oranları, cephe yönelimi, malzeme özellikleri ve iklim verileri gibi parametreleri dikkate alarak dinamik enerji tüketimi tahminleri oluşturmuş; aynı zamanda karbon ayak izi bileşenlerini de grafiksel olarak sunmuştur. Bu analiz çıktıları, üretken tasarım süreciyle elde edilen geometrilerin çevresel performans açısından ne ölçüde optimize edilebileceğini ve tasarım kararlarının enerji verimliliği üzerindeki etkisini doğrudan gösteren önemli bir karar destek aracı niteliğindedir. Şekil 5.12, enerji performansı ve karbon analizi çalışmalarının Autodesk Insight platformu üzerinde gerçekleştirilen sonuçlarını kapsamlı bir biçimde sunmaktadır.



Şekil 5.12. Autodesk Insight platformunda gerçekleştirilen enerji performansı ve karbon analizi

Geliştirilen parametrik algoritmanın enerji performansı tahminlerindeki doğruluk düzeyini değerlendirmek amacıyla, algoritma tarafından otomatik olarak hesaplanan EUI değerleri ile Autodesk Insight platformunda gerçekleştirilen manuel simülasyonlardan elde edilen EUI değerleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırma, farklı cephe parametrelerine sahip on ayrı tasarım alternatifi üzerinden yürütülmüş ve her bir alternatif için iki farklı yöntemden elde edilen EUI değerleri kWh/m²·yıl cinsinden tablolaştırılmıştır.

Karşılaştırma sürecinde, her alternatif için geliştirilen algoritmanın tahmin ettiği enerji kullanım yoğunluğu ile Insight platformunda oluşturulan analitik modelden elde edilen sonuçlar arasında mutlak fark hesaplanmış; bu fark doğrultusunda, “Gerçeklik Yüzdesi” olarak adlandırılan bir doğruluk ölçütü formüle edilmiştir. Bu ölçüt, otomatik algoritmanın çıktılarının manuel olarak yapılan enerji simülasyonlarına ne derece yakın olduğunu sayısal olarak ifade etmektedir.

Analiz sonuçları Çizelge 5.5’de paylaşılmıştır, tüm varyasyonlar için doğruluk oranlarının %89,66 ile %98,61 arasında değiştiğini ve ortalama olarak %94,04 gibi oldukça yüksek bir değer elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu yüksek örtüşme oranı, algoritmanın enerji performans çıktılarında güvenilir ve istikrarlı tahminler sunduğunu göstermektedir. Ayrıca bu durum, geliştirilen sistemin erken tasarım aşamasında farklı senaryolar arasında enerji

verimliliğine dayalı kararların hızlı ve güvenilir biçimde alınabilmesine katkı sağlayabileceğini ve parametrik tasarım süreci ile enerji simülasyonu arasında etkili bir entegrasyon sağlandığını göstermektedir.

Gerçeklik Yüzdesi Hesaplama Formülü

Gerçeklik Yüzdesi = (1 - |Manuel EUI - Otomatik EUI| / Manuel EUI) × 100

Çizelge 5.5. Geliştirilen algoritmadan elde edilen EUI ve Insight Platformu EUI karşılaştırması ve gerçeklik yüzdesi dağılımı

	Manuel EUI	Otomatik EUI	Gerçeklik %
Alternatif 1	65,3	63,87	92,27
Alternatif 2	75,65	69,80	97,81
Alternatif 3	69,09	66,4	95,59
Alternatif 4	67,95	65,01	95,67
Alternatif 5	68,25	64,34	98,61
Alternatif 6	66,49	62,95	94,68
Alternatif 7	71,96	65,25	90,68
Alternatif 8	72,56	65,06	89,66
Alternatif 9	69,55	66,28	95,30
Alternatif 10	68,58	61,83	90,16
Ortalama			94,04

Bu analiz sonuçları doğrultusunda, geliştirilen algoritmanın enerji performansı tahminlerine ilişkin doğruluk oranı %89,66 ile %98,61 aralığında değişmekte olup, ortalama doğruluk %94,04 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek doğruluk düzeyi, algoritmanın oluşturduğu enerji performans çıktılarının Autodesk Insight platformu tarafından elde edilen simülasyon verileriyle büyük ölçüde örtüştüğünü göstermektedir.

Söz konusu uyum, üretken tasarım sürecine entegre edilen parametrik enerji simülasyonu algoritmasının, alternatif tasarımlar arasında enerji açısından karar verici bir araç olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu sayede, erken tasarım aşamasında geliştirilen form ve cephe varyasyonlarının enerji verimliliği bakımından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi mümkün olmakta; böylece tasarımcıya hem optimizasyon destekli hem de veriye dayalı bir karar mekanizması sunulmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, BIM (Bina Bilgi Modellemesi) tabanlı üretken tasarım algoritmalarının erken tasarım sürecine entegrasyonu yoluyla, enerji etkin bina formlarının sistematik olarak üretilebileceğini ve değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, BIM projeleri için geliştirilen üretken tasarımı algoritmasına odaklanarak çalışmamızın yeniliğini vurgulamaktadır geliştirilen metodoloji, Revit-Dynamo platformu üzerinde tanımlanan parametrik kurallar aracılığıyla, çeşitli bina kütleleri ve cephe varyasyonları oluşturarak bu alternatifleri enerji performansı açısından karşılaştırılabilir hâle getirmiştir. Bu metodolojiyi test ederek, mimarların çeşitli tasarım çözümlerini kavramsal düzeyde değerlendirmelerini sağlayan yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu erken değerlendirme, mimarların en uygun tasarım seçeneğini en baştan belirlemelerini sağlayarak tasarım sürecinin sonraki aşamalarında zaman ve maliyetlerin azaltılmasına yol açar. Araştırmanın bu yönü, mimari uygulamalar ve bina tasarımında karar alma açısından pratik çıkarımlar taşır. Ancak, çalışmadaki belirli teknik sınırlamaları kabul etmek önemlidir. Geliştirdiğimiz algoritma, 12 karenin karışımı ile oluşan şekilleri özel olarak değerlendirir. Bu adımda kullanılan biçim gramer kuralları, kullanıcı tarafından değiştirilebilir ve geliştirilebilir yapıdadır. Bu sayede, farklı ihtiyaçlara ve iklim koşullarına uyum sağlayabilen daha esnek ve özelleştirilebilir bina formları üretmek mümkün olur. Ancak bu çalışmada diğer karmaşık yapı şekilleri değerlendirme sürecinin dışında tutulmuştur. Geliştirilen metodoloji, yalnızca biçimsel çeşitliliğin görsel olarak sunulması ile sınırlı kalmamakta; aynı zamanda kompaktlık, biçim faktörü, pencere-duvar oranı (WWR) gibi geometrik parametrelerin enerji performansı üzerindeki etkilerini nicel olarak analiz etmektedir. Mimarlara yalnızca görsel estetik değil, aynı zamanda enerji verimliliği temelli performans kriterleri doğrultusunda karar verebilecekleri alternatifler sunmaktadır. Revit-Dynamo ortamında geliştirilen parametrik algoritmalar ve enerji simülasyon araçları yardımıyla, farklı bina formları ve cephe tasarımları sistematik olarak analiz edilerek optimum çözümler belirlenmiştir. Araştırma kapsamında geliştirilen algoritma, mimarların kavramsal tasarım aşamasında çoklu tasarım alternatiflerini sistematik biçimde üretmelerine ve bu alternatifleri enerji performansı temelli ölçütler doğrultusunda değerlendirmelerine olanak tanıyan yenilikçi bir karar destek aracıdır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler, soğuk ve kuru iklim koşulları özelinde yürütülmüştür. Bu iklim senaryosuna göre, özellikle güney cephelerde daha yüksek pencere-

duvar oranlarının tercih edilmesiyle pasif ısı kazançlarının artırılabileceği; kuzey, doğu ve batı cephelerinde ise daha sınırlı açıklık kullanımı ile ısı kayıplarının minimize edilebileceği belirlenmiştir. Ayrıca, kompakt formda tasarlanan yapıların, yüzey alanı/hacim oranı bakımından daha avantajlı olduğu ve dolayısıyla enerji verimliliği açısından daha başarılı sonuçlar sunduğu ortaya konmuştur. Bu bağlamda, şekilsel varyasyonların yalnızca estetik değil, aynı zamanda performans odaklı kriterlerle ilişkilendirilmesi, mimari tasarım sürecinde veriye dayalı karar almanın önemini bir kez daha vurgulamaktadır. Sonuç olarak, geliştirilen algoritma, erken tasarım aşamasında mimarların farklı bina formları üretmesine, bu formları enerji performansı açısından karşılaştırmasına ve en uygun tasarım alternatiflerini belirlemesine olanak tanımaktadır. Parametrik tanımlamalar aracılığıyla elde edilen tasarım varyasyonları, hem biçimsel hem de enerji verimliliği açısından sistematik bir şekilde analiz edilebilmiştir. Bu süreç, üretken tasarım yaklaşımının ve BIM tabanlı enerji modellemesinin entegre kullanımının, enerji performansına duyarlı tasarım kararlarının alınmasında etkili bir araç olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Algoritmanın doğruluğunu ölçme amacı ile elde edilen otomatik tasarım alternatifleri, Autodesk Revit ortamında manuel olarak yeniden modellenmiş ve Autodesk Insight platformunda enerji simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu süreç, algoritma ile otomatik üretilen enerji tahminlerinin güvenilirliğini test etmek amacıyla yürütülmüş olup, on farklı varyasyon üzerinde karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Karşılaştırma sonuçlarına göre, algoritmanın enerji performansı tahminleri ile manuel simülasyon sonuçları arasında yüksek düzeyde bir örtüşme gözlemlenmiş; doğruluk oranları %89,66 ile %98,61 arasında değişmiş ve ortalama %94,04 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgu, geliştirilen algoritmanın enerji kullanım yoğunluğu hesaplamalarında güvenilir çıktılar sunduğunu ve Insight gibi profesyonel simülasyon platformlarıyla uyumlu çalıştığını ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma enerji etkin tasarım kararlarının hızlı, esnek ve veri odaklı bir şekilde alınabilmesini sağlayan parametrik bir araç geliştirilmesine olanak sağlamış ve üretken tasarım yaklaşımlarının bina enerji modellemesi ile bütünleşik olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Bu entegrasyon, özellikle erken tasarım aşamalarında çoklu senaryo üretimi ve değerlendirmesi açısından önemli bir karar destek mekanizması sunmaktadır.

Bu çalışmada ulaşılan bulgular doğrultusunda, aşağıdaki öneriler gelecekteki araştırmalara ışık tutabilir:

- Algoritmanın farklı iklim bölgelerine uyarlanabilirliğini sağlamak adına, farklı biçim gramerleri kuralları içeren parametrik bileşen kütüphaneleri oluşturulmalıdır. Bu sayede algoritma, farklı iklim koşullarına sahip projelerde yeniden yapılandırılarak kullanılabilir hale gelecektir.
- Üretken tasarım algoritmalarının kullanıcı ihtiyaçlarına, bağlama ve tasarım hedeflerine dinamik olarak uyum sağlayabilmesi için makine öğrenmesi temelli modelleme yaklaşımlarıyla desteklenmesi önemlidir. Bu tür yaklaşımlar sayesinde algoritmanın, öğrenme temelli evrimsel tasarım süreçlerine entegre edilmesi ve farklı senaryolara adapte olabilmesi sağlanabilir.
- Sadece enerji kullanım yoğunluğu (EUI) değil, aynı zamanda karbon salımı (gömülü ve işletme karbonu), yaşam döngüsü maliyeti, gün ışığı erişimi, iç mekân konforu gibi çok kriterli performans göstergelerinin de dikkate alındığı kapsamlı değerlendirme çerçevelerinin oluşturulması önerilmektedir. Bu sayede daha bütüncül ve sürdürülebilir tasarım kararları alınabilecektir.
- Üretken tasarım süreçlerinde hem estetik hem de performans kriterlerinin eş zamanlı olarak optimize edilebilmesi amacıyla, yapay zekâ destekli karar destek sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Böylece tasarımcılar, geniş varyasyon havuzları içinde daha etkin ve nitelikli seçimler yapabileceklerdir.
- Tasarım sürecinin yapım aşamasındaki sınırlamaları, malzeme temini, kullanıcı davranışları ve operasyonel değişkenleri içerecek şekilde zenginleştirilmiş, gerçek uygulama verileriyle beslenen bütüncül simülasyon modellerinin geliştirilmesi, teorik modeller ile pratik gerçeklik arasındaki uyumu artıracaktır.
- Bu çalışmada plan tipi sabit tutulmuş ve yalnızca yapı formu ile cephe varyasyonları üzerinde durulmuştur. Oysa gerçek tasarım süreçlerinde plan tipolojisi, yapı performansını belirleyen temel unsurlardan biridir. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda, farklı plan şemalarının (ör. koridorlu, atriumlu, çekirdek çevresinde düzenlenen vb.) parametrik olarak tanımlandığı ve algoritma tarafından üretilebildiği sistemlerin geliştirilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım, yalnızca cephe değil, tüm bina organizasyonunun performansa dayalı olarak optimize edilmesine olanak sağlayarak daha bütüncül çözümler üretilmesini mümkün kılacaktır.

Geliştirilen algoritmanın, enerji etkin bina tasarım sürecine katkı sunabilecek pratik bir araç hâline getirilmesi amacıyla, Autodesk Revit platformuna entegre edilen Üretken Tasarım modülüyle uyumlu biçimde çalışacak şekilde optimize edilmesi önerilmektedir. Bu bağlamda, algoritmanın Autodesk'in sağladığı API ve Dynamo ortamı aracılığıyla parametrik tasarım süreçlerine entegre edilmesi, kullanıcıların erken tasarım aşamasında performansa dayalı kararlar almasını kolaylaştıracaktır. Gelecek çalışmalarda, bu algoritmanın Autodesk ile iş birliği çerçevesinde açık erişimli bir eklenti olarak geliştirilmesi ve farklı disiplinlerden tasarımcıların erişimine sunulması, uygulamanın yaygınlaştırılması açısından önemli bir adım olacaktır. Böyle bir yaklaşım, yalnızca akademik alanda değil, aynı zamanda mesleki pratikte de enerji verimliliği odaklı tasarım kültürünün yaygınlaşmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca, kullanıcı deneyimlerine dayalı geribildirimlerle algoritmanın performansının sürekli olarak değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi mümkün olacaktır. Gelecekte yapılacak çalışmalarla algoritmanın işlevselliğinin artırılması, karar destek sistemleri ile entegrasyonunun sağlanması ve disiplinlerarası iş birliği olanaklarının güçlendirilmesi, sürdürülebilir mimarlık alanında anlamlı ilerlemelere zemin hazırlayacaktır.

KAYNAKLAR

Abanda, F. ve Byers, L. (2016). An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy, 97*, 517-527.

Abdalla, S. B., Rashid, M. ve Ara, D. R. (2021). Plausibility of CAAD in conceptual design: challenges in architectural engineering for early-stage digital design tools. *Journal of Architectural Engineering, 27*(2), 04021004.

Ahn, K. U., Kim, Y. J., Park, C. S., Kim, I., Lee, K. (2014). BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation. *Energy and Buildings*, *68*, 671-678.

Ahuja, S., Chopson, P., Haymaker, J., Augenbroe, G. (2015). Practical energy and cost optimization methods for selecting massing, materials, and technologies. *Architectural Research*, 280.

AIA Energy Modeling Working Group. (2012). An architect's guide to integrating energy modeling in the design process. *American Institute of Architects, 86*.

Akbarieh, A. (2018). *Systematic investigation of interoperability issues between building information modelling and building energy modelling-BIM-based BEM information exchange issues*. Yüksek Lisans Tezi, NTNU, Trondheim.

Alfaris, A. A. F. (2009). *Emergence through conflict: the Multi-Disciplinary Design System (MDDS).* Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.

Alhammad, M., Eames, M. ve Vinai, R. (2024). Enhancing Building Energy Efficiency through Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Modeling (BEM) Integration: A Systematic Review. *Buildings, 14*(3), 581.

AlizadehKharazi, B., Alvanchi, A. ve Taghaddos, H. (2020). A novel building information modeling-based method for improving cost and energy performance of the building envelope. *International Journal of Engineering, 33*(11), 2162-2173.

Andriamamonjy, A., Saelens, D., Klein, R. (2018). An automated IFC-based workflow for building energy performance simulation with Modelica. *Automation in Construction*, 91, 166-181.

Andriamamonjy, A., Saelens, D., Klein, R. (2019). A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation. *Journal of Building Engineering*, 22, 513-527.

Arayici, Y., Fernando, T., Munoz, V., Bassanino, M. (2018). Interoperability specification development for integrated BIM use in performance based design. *Automation in Construction*, 85, 167-181.

Asl, M. R. (2015). *A Building Information Model (BIM) Based Framework for Performance Optimization*. Doktora Tezi, Texas A&M University, Texas.

Asl, M. R., Bergin, M., Menter, A., Yan, W. (2014). BIM-based parametric building energy performance multi-objective optimization. *Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, *32*(224), 1-10.

Asl, M. R., Zarrinmehr, S., Bergin, M., Yan, W. (2015). BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. *Energy and Buildings*, *108*, 401-412.

Asl, M., Xu, W., Shang, J., Tsai, B., Molloy, I. (2016, 10–12 Ağustos). *Regression-based building energy performance assessment using building information model (BIM).* Paper presented at the ASHRAE IBPSA-USA SimBuild Conference 2016, Utah, USA, 357-364.

Azari, R., Kim, Y. W. (2016). Integration evaluation framework for integrated design teams of green buildings: Development and validation. *Journal of Management in Engineering*, *32*(3), 04015053.

Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and management in engineering*, *11*(3), 241-252.

Azhar, S., Brown, J. (2009). BIM for sustainability analyses. *International Journal of Construction Education and Research*, *5*(4), 276-292.

Azhar, S., Brown, J. ve Sattineni, A. (2011). *A case study of building performance analyses using building information modeling.* Paper presented at the 27th international symposium on automation and robotics in construction (ISARC-27), Bratislava, Slovakia, 25-27.

Bambardekar, S. ve Poerschke, U. (2009). *The architect as performer of energy simulation in the early design stage.* Paper presented at the 11th International IBPSA Conference-Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland, 1306-1313.

Bazjanac, V. (2001). *Acquisition of building geometry in the simulation of energy performance*, Paper presented at the 2001 Building Simulation Conference, Rio de Janeiro, Brazil, Ağustos, 13-15.

Bazjanac, V. (2008). *IFC BIM-based methodology for semi-automated building energy performance simulation* (draft report). Berkeley, California. Lawrence Berkeley National Laboratory.

Bazjanac, V. (2009). *Implementation of semi-automated energy performance simulation: building geometry* (draft report). Berkeley, California. Lawrence Berkeley National Laboratory..

Bazjanac, V., Maile, T. (2004). *IFC HVAC interface to EnergyPlus-A case of expanded interoperability for energy simulation* (draft report). Berkeley, California. Lawrence Berkeley National Laboratory.

Bazjanac, V. ve Kiviniemi, A. (2007). *Reduction, simplification, translation and interpretation in the exchange of model data* (draft report). Berkeley, California. Lawrence Berkeley National Laboratory.

Beetz, J., van Berlo, L., de Laat, R., van den Helm, P. (2010, 16-19 Kasım). *BIMserver. org–An open source IFC model server.* In Proceedings of the CIP W78 conference, Cairo, *Egypt*, 8.

Belek, A. N., Yamaçlı, R. (2023). Adaptif Cephe Sistemlerinin Sürdürülebilir Tasarım Kriterlerine Yönelik Tasarım Çözümleri. *ArtGRID-Journal of Architecture Engineering and Fine Arts*, *5*(2), 216-239.

Bogenstätter, U. (2000). Prediction and optimization of life-cycle costs in early design. *Building Research Information*, *28*(5-6), 376-386.

Borkowski, A. S. (2024). Low-Cost Internet of Things Solution for Building Information Modeling Level 3B—Monitoring, Analysis and Management. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, *13*(2), 19.

Boumaraf, H. (2022). *A System Proposal for Generative Design Processes and Space Analysis in Architecture*. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Bragança, L., Vieira, S. M., Andrade, J. B. (2014). Early stage design decisions: the way to achieve sustainable buildings at lower costs. *The scientific world journal*, *2014*(1), 365364.

Cagan, J., Campbell, M. I., Finger, S., Tomiyama, T. (2005). A framework for computational design synthesis: model and applications. *Journal of Computing and Information Science in Engineering,* 171-181.

Caldas, L. (2008). Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system. *Advanced Engineering Informatics, 22*(1), 59-70.

Caldas, L. ve Norford, L. (2001). *Architectural constraints in a generative design system: Interpreting energy consumption levels.* Paper presented at the Seventh international IBPSA conference, Rio, Brazil, 1397-1404.

Calquin, D. A. L., Wandersleben, G. ve Castillo, L. S. (2014). Interoperability map between BIM and BPS software. In *Computing in Civil and Building Engineering,* 601-608.

Cardinali, R. (1994). Productivity improvements through the use of graphic user interfaces. *Industrial Management ve Data Systems, 94*(4), 3-7.

Cemesova, A., Hopfe, C. J. ve McLeod, R. S. (2015). PassivBIM: Enhancing interoperability between BIM and low energy design software. *Automation in Construction, 57*, 17-32.

Che, L., Gao, Z., Chen, D. ve Nguyen, T. H. (2010). *Using building information modeling for measuring the efficiency of building energy performance.* Paper presented at the Proceedings of the international conference on computing in civil and building engineering (ICCCBE), Nottingham, 165-170.

Chen, J., Wang, D., Shao, Z., Zhang, X., Ruan, M., Li, H., Li, J. (2023). Using artificial intelligence to generate master-quality architectural designs from text descriptions. *Buildings*, *13*(9), 2285.

Chen, Z., Deng, Z., Chong, A., Chen, Y. (2023, July). AutoBPS-BIM: A toolkit to transfer BIM to BEM for load calculation and chiller design optimization. *Building Simulation*, Tsinghua University Press, 1287-1298

Choi, J., Shin, J., Kim, M. ve Kim, I. (2016). Development of openBIM-based energy analysis software to improve the interoperability of energy performance assessment. *Automation in Construction, 72*, 52-64.

Ciccozzi, A., de Rubeis, T., Paoletti, D. ve Ambrosini, D. (2023). BIM to BEM for Building Energy Analysis: A Review of Interoperability Strategies. *Energies, 16*(23), 7845.

Coates, P. ve Hazarika, L. (1999). *The use of Genetic Programming for applications in the field of spatial composition.* Paper presented at the Proceedings of the 2nd Generative Art Conference (GA1999), Milan: Generative Design Lab Milan Polytechnic University, Italy, 19.

Cormier, A., Robert, S., Roger, P., Stephan, L. ve Wurtz, E. (2011). *Towards a BIM-based service oriented platform: application to building energy performance simulation.* Paper presented at the Proceedings of the 12th conference of international building performance simulation association, Sydney, Australia, 2309-2316.

Çelebi, B. (2022). *BIM tabanlı bina enerji simülasyon yazılımlarının analiz sonuçları üzerine bir inceleme.* Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Enformatik Anabilim Dalı, İstanbul.

Dapogny, C., Faure, A., Michailidis, G., Allaire, G., Couvelas, A. ve Estevez, R. (2017). Geometric constraints for shape and topology optimization in architectural design. *Computational Mechanics, 59*, 933-965.

Davies, I. ve Davies, I. (2020). The RIBA plan of work 2013. *Contract Administration*, 10-11.

Demir, G. ve Tanyıldızı, E. (2017). Optimizasyon Problemlerinin Çözümünde Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA)'nın Kullanılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 225-236.

Depcik, C. ve Assanis, D. N. (2005). Graphical user interfaces in an engineering educational environment. *Computer Applications in Engineering Education, 13*(1), 48-59.

Dinçer, A. E. (2014). *Hücresel Özdevinim Yaklaşımı İle Kitlesel Konut Tasarımında Sayısal Bir Model.* Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Ding, L. ve Gero, J. S. (2001). The emergence of the representation of style in design. *Environment and Planning B: Planning and Design,* 707-731.

Dortheimer, J., Schubert, G., Dalach, A., Brenner, L., Martelaro, N. (2023). Think AI-side the Box. Exploring the Usability of Text-to-Image Generators for Architecture Students. *Digital Design Reconsidered – eCAADe,* 567-576.

Eastman, C. M. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. New Jersey, Canada: John Wiley ve Sons, 626.

Echenagucia, T. M., Capozzoli, A., Cascone, Y., Sassone, M. (2015). The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Applied energy*, *154*, 577-591.

Eghbali, Z. ve Didari, A. (2018). *Green Building Design ve Construction Using Concept of Sustainability.* Paper presented at the International Conference on Civil, Structural ve Transportation Engineering, Niagara Falls, Canada, 135.

El Asmi, E., Robert, S., Haas, B., Zreik, K. (2015). A standardized approach to BIM and energy simulation connection. *International Journal of Design Sciences and Technology*, 21(1), 59-82.

Elbeltagi, E., Wefki, H., Abdrabou, S., Dawood, M., Ramzy, A. (2017). Visualized strategy for predicting buildings energy consumption during early design stage using parametric analysis. *Journal of Building Engineering,* 13, 127-136.

El-Darwish, I. ve Gomaa, M. (2017). Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency. *Alexandria engineering journal, 56*(4), 579-589.

El-Khaldi, M. M. S. (2007). *Mapping boundaries of generative systems for design synthesis*. Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Department of Architecture, Sharjah.

Elnabawi, M. H. (2020). Building information modeling-based building energy modeling: investigation of interoperability and simulation results. *Frontiers in Built Environment*, *6*, 573971.

Epstein, E. (2012). *Implementing successful building information modeling,* Boston, Massachusetts: Artech House, 255.

Farias, F., Kota, S., Alcocer, J. L. B., Haberl, J. S., Clayton, M. J. (2019). Development of a Reference Building Information Model (BIM) for Thermal Model Compliance Testing--Part II: Test Cases and Analysis. *ASHRAE Transactions*, *125*.

Farid Mohajer, M. ve Aksamija, A. J. B. T. E. s. S. (2019). Integration of Building Energy Modeling (BEM) and Building Information Modeling (BIM): Workflows and Case Study. *Building Technology Educators' Society 2019*(1), 37.

Farzaneh, A. (2019). *Development of BIM-BEM framework to support the design process*. Doktora Tezi, École de technologie supérieure, Montréal, Kanada.

Fernald, H., Hong, S., Bucking, S., O'Brien, W. (2018, 9-10 Mayıs). *BIM to BEM translation workflows and their challenges: a case study using a detailed BIM model.* Proceedings of the eSim the 10th conference of IBPSA, Montréal, Canada, 482-491.

Fife, L. D., Henry, S. R. (1995). Improving Computer Simulation Through Use of a Graphical User Interface. *SPE Computer Applications*, *7*(01), 13-17.

Fox, S. ve Hietanen, J. (2007). Interorganizational use of building information models: potential for automational, informational and transformational effects. *Construction management and economics, 25*(3), 289-296.

Gao, H., Koch, C., Wu, Y. (2019). Building information modelling based building energy modelling: A review. *Applied energy*, *238*, 320-343.

Gao, H., Zhang, L., Koch, C. ve Wu, Y. (2019, 30–31 Ağustos). *BIM-based real time building energy simulation and optimization in early design stage.* Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Chengdu, Çin, 6.

Garcia, E. G. ve Zhu, Z. (2015). Interoperability from building design to building energy modeling. *Journal of Building Engineering, 1*, 33-41.

Garwood, T. L., Hughes, B. R., O'Connor, D., Calautit, J. K., Oates, M. R. ve Hodgson, T. (2018). A framework for producing gbXML building geometry from Point Clouds for accurate and efficient Building Energy Modelling. *Applied Energy, 224*, 527-537.

Gero, J. S. ve Kazakov, V. A. (1998). Evolving design genes in space layout planning problems. *Artificial intelligence in engineering, 12*(3), 163-176.

Giannakis, G. I., Lilis, G. N., Garcia, M. A., Kontes, G. D., Valmaseda, C., Rovas, D. V. (2015, 7-9 Aralık). *A methodology to automatically generate geometry inputs for energy performance simulation from IFC BIM models.* In 14th International Conference of IBPSA-Building Simulation, Hyderabad, Hindistan, 504-511.

Gourlis, G., Kovacic, I. (2017). Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings–A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *68*, 953-963.

Gökçeoğlu, U. ve Değer, Z. (2023). Betonarme Yüksek Binaların TBDY 2018'e Göre Performansa Dayalı Tasarımı-Örnek Uygulama. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11*(2), 535-550.

Grobman, Y. J., Yezioro, A. ve Capeluto, I. G. (2009). Computer-based form generation in architectural design—a critical review. *International Journal of Architectural Computing, 7*(4), 535-553.

Gu, N. ve Amini Behbahani, P. (2021). Shape grammars: A key generative design algorithm. In *Handbook of the Mathematics of the Arts and Sciences*, Cham:Springer 1385-1405.

Guest, J. K., Moen, C. D. (2010). *Reinforced concrete design with topology optimization.* In Structures Congress 2010: 19th Analysis and Computation Specialty Conference, Florida, 445-454.

Guest, J., Eaglin, T., Subramanian, K., Ribarsky, W. (2013). Visual analysis of situationally aware building evacuations. In *Visualization and Data Analysis,*182-195

Guzmán, E. ve Zhu, Z. (2014). Interoperability between building design and building energy analysis. In *Computing in Civil and Building Engineering,* 17-24.

Gülaçmaz, Ö., Başdemir, H. ve Gülaçmaz, E. (2022). Mevcut bir eğitim yapısında enerji verimliliğini iyileştirmeye yönelik bir analiz. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10*(1), 325-341.

Gürsel Dino, İ. (2012). Creative design exploration by parametric generative systems in architecture. *ODTÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2012 (1)*, 207-224.

Ham, Y. ve Golparvar-Fard, M. (2015). Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling. *Automation in Construction, 49*, 214-224.

Hamida, M. B., Ahmed, W., Asif, M. ve Almaziad, F. A. (2020). Techno-economic assessment of energy retrofitting educational buildings: A case study in Saudi Arabia. *Sustainability, 13*(1), 179.

Hemsath, T. L. (2013, 26-28 Ağustos). *Conceptual energy modeling for architecture, planning and design: Impact of using building performance simulation in early design stages.* Paper presented at the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 376-384.

Hollberg, A., Lichtenheld, T., Klüber, N., Ruth, J. (2018). Parametric real-time energy analysis in early design stages: a method for residential buildings in Germany. *Energy, Ecology and Environment*, *3*(1), 13-23.

Hyun, S., Marjanovic-Halburd, L. ve Raslan, R. (2015). Investigation into informational compatibility of Building Information Modelling and Building Performance Analysis software solutions. *WIT Transactions on The Built Environment, 149*, 543-553.

Issa, M. A. A. (2018). *Building Performance Simulation for Architects, Comparing Three Leading Simulation Tools.* Yüksek Lisans Tezi, The University of Texas, San Antonio,

Jalaei, F. (2015). *Integrate building information modeling (BIM) and sustainable design at the conceptual stage of building projects.* Doktora Tezi, Ottawa University, Ottawa.

Jalaei, F. ve Jrade, A. (2014a). An automated BIM model to conceptually design, analyze, simulate, and assess sustainable building projects. *Journal of Construction Engineering,* 2014 (1), 672896.

Jalaei, F. ve Jrade, A. (2014b). Integrating Building Information Modeling (BIM) and Energy Analysis Tools with Green Building Certification System to Conceptually Design Sustainable Buildings. *Itcon, 19*, 494-519.

Jeong, W., Kim, J. B., Clayton, M., Haberl, J., Yan, W. (2013). Visualization of building energy performance in building information models. *Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 16*.

Jeong, W. S. (2014). *Integrating Building Information Modeling with Object-Oriented Physical Modeling for Building Thermal Simulation.* Doktora Tezi, Texas A&M University, Texas.

Jeong, W., Kim, K. H. (2016). A performance evaluation of the BIM-based object-oriented physical modeling technique for building thermal simulations: A comparative case study. *Sustainability*, *8*(7), 648.

Jeong, W., Son, J. (2016). An algorithm to translate building topology in building information modeling into object-oriented physical modeling-based building energy modeling. *Energies*, *9*(1), 50.

Jeong, W., Kim, J. B., Clayton, M. J., Haberl, J. S., Yan, W. (2016). A framework to integrate object-oriented physical modelling with building information modelling for building thermal simulation. *Journal of Building Performance Simulation*, *9*(1), 50-69.

Jeong, W., Kim, J. B., Clayton, M. J., Haberl, J. S., Yan, W. (2014). Translating building information modeling to building energy modeling using model view definition. *The Scientific World Journal*, *2014*(1), 638276.

Jiang, Y., Yu, N., Ming, J., Lee, S., DeGraw, J., Yen, J., ... Wu, D. (2015). Automatic building information model query generation. *Journal of Information Technology in Construction*, 518-535.

Kabošová, L., Katunský, D. ve Kmet, S. (2020). Wind-based parametric design in the changing climate. *Applied Sciences, 10*(23), 8603.

Kalay, Y. E. (2004). *Architecture's new media: Principles, theories, and methods of computer-aided design.* Cambridge:MIT press.

Kamel, E., Memari, A. M. (2018). Automated building energy modeling and assessment tool (ABEMAT). *Energy*, *147*, 15-24.

Kamel, E. ve Memari, A. M. (2018). *Software Tool for Automation in Building Energy Simulation Using Building Information Modeling (BIM)*. Paper presented at the 4th Residential Building Design ve Construction ConferenceAt: Penn Stater Conference Center, Pennsylvania, 10.

Kamel, E. ve Memari, A. M. (2019). Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. *Automation in Construction, 97*, 164-180.

Kang, T. (2020). Bim-based human machine interface (Hmi) framework for energy management. *Sustainability, 12*(21), 8861.

Kim, H., Shen, Z., Kim, I., Kim, K., Stumpf, A. ve Yu, J. (2016). BIM IFC information mapping to building energy analysis (BEA) model with manually extended material information. *Automation in Construction, 68*, 183-193.

Kim, H. ve Anderson, K. (2013). Energy modeling system using building information modeling open standards. *Journal of Computing in Civil Engineering, 27*(3), 203-211.

Kim, I., Kim, J. ve Seo, J. (2012). Development of an IFC-based IDF converter for supporting energy performance assessment in the early design phase. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 11*(2), 313-320.

Kim, J. B., Jeong, W., Clayton, M. J., Haberl, J. S., Yan, W. (2015). Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation. *Automation in construction*, *50*, 16-28.

Kim, S., Zadeh, P. A., Staub-French, S., Froese, T. ve Cavka, B. T. (2016). Assessment of the impact of window size, position and orientation on building energy load using BIM. *Procedia Engineering, 145*, 1424-1431.

Knight, T. (1999). *Applications in architectural design, and education and practice.* Report for the NSF/MIT Workshop on Shape Computation.

Kolarevic, B. (2000). Digital morphogenesis and computational architectures. *Construindo n (o) espaço digital, PROURB, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*, 98-103.

Kolarevic, B. (2003). *Computing the performative in architecture.* Paper presented at the Proceedings of the 21th eCAADe Conference: Digital Design. Graz, Austria, 17-20.

Konis, K., Gamas, A. ve Kensek, K. (2016). Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. *Solar Energy, 125*, 161-179.

Kota, S., Stipo, F. J. F., Jeong, W., Kim, J. B., Alcocer, J. L. B., Clayton, M. J., Haberl, J. S. J. A. T. (2016). Development of a Reference Building Information Model for Thermal Model Compliance Testing--Part I: Guidelines for Generating Thermal Model Input Files. *122*(1),104.

Kozlovska, M., Petkanic, S., Vranay, F., Vranay, D. (2023). Enhancing energy efficiency and building performance through BEMS-BIM integration. *Energies*, *16*(17), 6327.

Kumar, S. (2008). *Interoperability between building information models (BIM) and energy analysis programs*, Yüksek Lisans Tezi, University of Southern California, Faculty of Architecture, California.

Larsson, N. (2009). The integrated design process; history and analysis. *International initiative for a sustainable built environment Report*, Ottawa, Canada,16.

Lee, G., Park, Y. H. ve Ham, S. (2013). Extended Process to Product Modeling (xPPM) for integrated and seamless IDM and MVD development. *Advanced Engineering Informatics, 27*(4), 636-651.

Lee, J., Park, M., Lee, H.-s., Kim, M. ve Hyun, H. (2015). Development of Conceptual Modular Building Unit Design Framework for Inexperienced Designers at the Pre-Design Stage. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, 188-195.

Li, J., Lu, S., Wang, W., Huang, J., Chen, X. ve Wang, J. (2018). Design and Climate-Responsiveness Performance Evaluation of an Integrated Envelope for Modular Prefabricated Buildings. *Advances in Materials Science and Engineering, 2018*(1), 8082368.

Lilis, G. N., Giannakis, G. I., Rovas, D. V. (2017). Automatic generation of second-level space boundary topology from IFC geometry inputs. *Automation in Construction*, *76*, 108-124.

Lim, Y., Majid, H., Samah, A., Ahmad, M. ve Ossen, D. (2018). BIM and genetic algorithm optimisation for sustainable building envelope design. *Building Information Systems in the Construction Industry, 159*.

Lim, Y., Sediadi, E., Shahsavari, F., Noor, F. ve Azli, M. J. A. (2016, 25–26 Nisan*). Building information modelling for building energy efficiency evaluation*. 4th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering (ACE 2016), Canning Walk, Singapur, 42-48.

Lin, S.-H. E. (2014). *Designing-in performance: energy simulation feedback for early stage design decision making*. Doktora Tezi, University of Southern California, California.

Lindenmayer, A. (1968). Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of theoretical biology, 18*(3), 280-299.

Liu, X., Ding, Z., Li, X. ve Xue, Z. (2023). Research progress, hotspots, and trends of using bim to reduce building energy consumption: Visual analysis based on wos database. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 20*(4), 3083.

Luyten, L. (2022). Structure as (primary) generator of architectural design: a study of a master dissertation studio. *Architecture, Structures and Construction, 2*(1), 129-143.

Magdy, H. ve Eldaly, H. (2020). *Applying Swarm Intelligence in Architectural Design.* Paper presented at the Architecture and Urbanism: A Smart Outlook: Proceedings of the 3rd International Conference on Architecture and Urban Planning, Cairo, Egypt, 77-87.

Maile, T., Fischer, M., Bazjanac, V. (2007). Building energy performance simulation tools-a life-cycle and interoperable perspective. *Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Working Paper*, *107*(December), 1-49.

Mésároš, P., Spišáková, M., Mandičák, T., Čabala, J. ve Oravec, M. M. (2021). Adaptive design of formworks for building renovation considering the sustainability of construction in BIM environment—Case study. *Sustainability, 13*(2), 799.

Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour*: Oxford university press, New York, 349.

Moon, H. J., Choi, M. S., Kim, S. K. ve Ryu, S. H. (2011, 14–16 Kasım). *Case studies for the evaluation of interoperability between a BIM based architectural model and building performance analysis programs.* Paper presented at the Proceedings of 12th conference of international building performance simulation association, Sydney, Avustralya, 1521-1526.

Negendahl, K. (2015). Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. *Automation in Construction, 54*, 39-53.

Negendahl, K., Nielsen, T. R. (2015). Building energy optimization in the early design stages: A simplified method. *Energy and Buildings*, *105*, 88-99.

Newton, D. (2019). Generative deep learning in architectural design. *Technology| Architecture+ Design, 3*(2), 176-189.

Nguyen, A. T., Reiter, S., Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied energy*, *113*, 1043-1058.

Nowak, A. (2015). Application of Voronoi diagrams in contemporary architecture and town planning. *Challenges of Modern Technology, 6*(2), 30--34.

O'Sullivan, B. ve Keane, M. (2005). *Specification of an IFC based intelligent graphical user interface to support building energy simulation.* Paper presented at the Proceedings of the Ninth International IBPSA Conference, Canada, 1-7.

O'Donnell, J. (2012). SimModel: A domain data model for whole building energy simulation (draft report). Berkeley, California. Lawrence Berkeley National Laboratory, 12.

O'Donnell, J. T. (2013). Transforming BIM to BEM: Generation of building geometry for the NASA Ames sustainability base BIM (draft report). Berkeley, California. Lawrence Berkeley National Laboratory, 28.

Oh, S. M., Kim, Y. J., Park, C. S. (2011, November). Process-driven BIM-based optimal design using integration of EnergyPlus, genetic algorithm, and pareto optimality. In *Building Simulation 2011*, 894-901.

Paulson Jr, B. C. (1976). Designing to reduce construction costs. *Journal of the construction division, 102*(C04).

Petersen, S., Svendsen, S. (2011). Method for simulating predictive control of building systems operation in the early stages of building design. *Applied energy*, *88*(12), 4597-4606.

Petráková, L. ve Šimkovič, V. (2023). Architectural alchemy: leveraging artificial intelligence for inspired design–a comprehensive study of creativity, control, and collaboration. *Archit. Pap. Fac. Archit. Des. STU, 28*(4), 3-14.

Pinheiro, S. V., Wimmer, R., Maile, T. ve O'Donnell, J. (2016, 14–16 Eylül). *Model view definition for advanced building energy performance simulation.* Paper presented at the CESBP/BauSIM 2016: CESBP Central European Symposium on Building Physics, Technische Universität Dresden, Germany, 14-16.

Pinheiro, S., Wimmer, R., O'Donnell, J., Muhic, S., Bazjanac, V., Maile, T., ... van Treeck, C. (2018). MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation. *Automation in Construction*, *90*, 91-103.

Prada-Hernandez, A. V., Rojas-Quintero, J. S., Vallejo-Borda, J. A., Ponz-Tienda, J. L. (2015). Interoperability of building energy modeling (BEM) with building information modeling (BIM). *Proceedings of the SIBRAGEC ELAGEC*, 519-526.

Rafiei, M. H. ve Adeli, H. (2016). Sustainability in highrise building design and construction. *The Structural Design of Tall and Special Buildings, 25*(13), 643-658.

Rahmani Asl, M., Zarrinmehr, S., Yan, W. (2013). Towards BIM-based parametric building energy performance optimization. *Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA),* Cambridge, Canada, 24-27.

Ramaji, I. J., Messner, J. I., Leicht, R. M. (2016). Leveraging Building Information Models in IFC to perform energy analysis in Openstudio. *Proceedings of SimBuild*, *6*(1), 251-258.

Ramaji, I. J., Messner, J. I., Mostavi, E. (2020). IFC-based BIM-to-BEM model transformation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *34*(3), 04020005.

Rasheed, K. M. (1998). *GADO: A genetic algorithm for continuous design optimization*. Doktora Tezi, Teknik Rapor, Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies, New Jersey, ABD.

Ratajczak, J., Siegele, D. ve Niederwieser, E. (2023). Maximizing Energy Efficiency and Daylight Performance in Office Buildings in BIM through RBFOpt Model-Based Optimization: The GENIUS Project. *Buildings, 13*(7), 1790.

Reeves, T., Olbina, S. ve Issa, R. (2012). Guidelines for using Building Information Modeling (BIM) for environmental analysis of high-performance buildings. In *Computing in Civil Engineering (2012)* 277-284.

Remmen, P., Cao, J., Ebertshäuser, S., Frisch, J., Lauster, M., Maile, T., Streblow, R. (2015, 7–9 Aralık). *An open framework for integrated BIM-based building performance simulation using Modelica.* Paper presented at the Proceedings of the 14th IBPSA Conference, Hyderabad, Hindistan, 8.

Rose, C. M. ve Bazjanac, V. (2015). An algorithm to generate space boundaries for building energy simulation. *Engineering with Computers, 31*(2), 271-280.

Salakij, S., Yu, N., Paolucci, S. ve Antsaklis, P. (2016). Model-Based Predictive Control for building energy management. I: Energy modeling and optimal control. *Energy and Buildings, 133*, 345-358.

Salge, C., Lipski, C., Mahlmann, T., Mathiak, B. (2008, 9-10 Ağustos). *Using genetically optimized artificial intelligence to improve gameplaying fun for strategical games*. In Proceedings of the 2008 ACM SIGGRAPH symposium on Video games, California, 7-14.

Sanguinetti, P. ve Eastman, C. (2015). Automated energy performance visualization for BIM. *Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice*, 119-128.

Santiago, P. (2016). BIM to BEM as Teaching Methodology to Support Sustainable Construction Decisions. *Periodica Polytechnica Architecture*, *47*(2), 94-98.

Santos, L., Schleicher, S. ve Caldas, L. (2017). Automation of CAD models to BEM models for performance based goal-oriented design methods. *Building and Environment, 112*, 144-158.

Savaşkan, M. O. (2015). *Yüksek Enerji Performanslı Konut Yapıları İçin Bım Tabanlı Bir Açık Kaynak Bilgi Sistemi Modeli.* Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

See, R., Haves, P., Sreekanthan, P., O'Donnell, J., Basarkar, M. ve Settlemyre, K. (2011, 14–16 Kasım). *Development of a user interface for the EnergyPlus whole building energy simulation program.* Paper presented at the Proceedings of the 12th International IBPSA Conference, Sydney, Australia, 2919-2926.

Senave, M., Boeykens, S. (2015). Link between BIM and energy simulation. *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations*, *149*, 341-352.

Serginson, M., Mokhtar, G., Kelly, G. (2013). A theoretical comparison of traditional and integrated project delivery design processes on international BIM competitions. *International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM)*, *2*(4), 52-64.

Shea, K., Aish, R. ve Gourtovaia, M. (2005). Towards integrated performance-driven generative design tools. *Automation in Construction, 14*(2), 253-264.

Shea, K. ve Cagan, J. (1999). The design of novel roof trusses with shape annealing: assessing the ability of a computational method in aiding structural designers with varying design intent. *Design Studies, 20*(1), 3-23.

Singh, V. ve Gu, N. (2012). Towards an integrated generative design framework. *Design Studies, 33*(2), 185-207.

Smith, D. ve Tardif, M. (2009). Building Information Modeling: A strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers. John Willey ve Son, New Jersey, ABD, 210.

Spiridigliozzi, G., Pompei, L., Cornaro, C., De Santoli, L. ve Bisegna, F. (2019, 5–7 Kasım). *BIM-BEM support tools for early stages of zero-energy building design.* Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bari, İtalya, 1-7.

Srivastava, R. (2021). *Proposing a Standard Reference Template (using LOD BIM) for the Project Manager to Evaluate the Parameters Needed for the Energy Simulation in the Early Phases of Building Design.* Yüksek Lisans Tezi, Joint Study Programme of Metropolia UAS and HTW, Berlin.

Steel, J., Drogemuller, R. ve Toth, B. (2012). Model interoperability in building information modelling. *Software ve Systems Modeling, 11*(1), 99-109.

Sultanguzin, I., Kruglikov, D., Yatsyuk, T., Kalyakin, I., Yavorovsky, Y. V. ve Govorin, A. (2019). *Using of BIM, BEM and CFD technologies for design and construction of energy-efficient houses.* Paper presented at the E3S Web of Conferences, Les Ulis, Fransa, 03014.

Sunarya, W., Subiyantoro, H., Harmunisa, Y. R. ve Maharani, R. T. (2022). The Implementatıon of Parametrıc Desıgn Practıce In Archıtecture Teachıng–How It Can Be Implemented In Indonesıa? *Journal of Architectureve Envıronment, 21*(2), 123-138.

Şanlıer, C., Börklü, H. R. ve Eldem, C. (2021). Dizüstü Bilgisayar Sehpası Tasarımı: Geleneksel ve Yeni İmalat Yöntemleri İçin Yapılan Tasarımlar ve Karşılaştırılması. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 5*(1), 65-75.

Tahmasebinia, F., Jiang, R., Sepasgozar, S., Wei, J., Ding, Y. ve Ma, H. (2022). Using regression model to develop green building energy simulation by BIM tools. *Sustainability, 14*(10), 6262.

Tan, Y., Shi, Y. ve Tang, Q. (2018). *Advances in Swarm Intelligence,* Cham, İsviçre: Springer, 653.

Villaggi, L. ve Nagy, D. (2019). Generative Design for Architectural Space Planning: The Case of the Autodesk University 2017 Layout. Report by Autodesk University, New York City, 14.

Watfa, M. K., Hawash, A. E. ve Jaafar, K. (2021). Using Building Information ve Energy Modelling for Energy Efficient Designs. *Journal of Information Technology in Construction,* 26, 427-440.

Wei, Y., Choi, H. ve Lei, Z. (2022). A generative design approach for modular construction in congested urban areas. *Smart and sustainable built environment, 11*(4), 1163-1181.

Welle, B., Haymaker, J., Rogers, Z. (2011, December). ThermalOpt: A methodology for automated BIM-based multidisciplinary thermal simulation for use in optimization environments. In *Building simulation* (Vol. 4, No. 4, pp. 293-313). Heidelberg: Tsinghua Press.

Wong, K. d. ve Fan, Q. (2013). Building information modelling (BIM) for sustainable building design. *Facilities, 31*(3/4), 138-157.

Wu, W. ve Issa, R. R. (2015). BIM execution planning in green building projects: LEED as a use case. *Journal of Management in Engineering, 31*(1), A4014007.

Yaman, B. ve Arpacıoğlu, Ü. (2021). Dinamik kontrollü uyarlanabilir cephe ve gölgeleme sistemleri. *Journal of Architectural Sciences and Applications, 6*(1), 153-164.

Yang, X.-S. (2021). Chapter 6 - Genetic Algorithms. In X.-S. Yang (Ed.), *Nature-Inspired Optimization Algorithms* (Second Edition) Massachusetts: Academic Press, 91-100.

Yu, N. (2014). Information interoperability between building information modeling authoring tools and simulation tools to support energy efficient building design. Yükseklisan Tezi, The Pennsylvania State University, College of Information Sciences and Technology, Pennsylvania.

Yu, N., Jiang, Y., Luo, L., Lee, S., Jallow, A., Wu, D., Yen, J. (2013, 6 Ağustos). Integrating BIMserver and OpenStudio for energy efficient building. In *Computing in Civil Engineering: Proceedings of the 2013 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering,* Reston, 516-523.

Yu, R. ve Gero, J. S. (2016). An empirical basis for the use of design patterns by architects in parametric design. *International Journal of Architectural Computing, 14*(3), 289-302.

Yuan, S., Hu, Z.-Z., Lin, J.-R. ve Zhang, Y.-Y. (2021). A framework for the automatic integration and diagnosis of building energy consumption data. *Sensors, 21*(4), 1395.

Zandavali, B. A. (2019). *Cellular automata: a bridge between building variability and urban form control.* Yüksek Lisans Tezi, Federal University of Rio Grande do Sul, Architecture and Urbanism Project, Porto Alegre, Brezilya.

Zang, Z. ve Ding, W. (2024, 17 Aralık). *Eco-Centric Generative Design Workflow: Extending Sustainability in Architecture.* Paper presented at the International Symposium on World Ecological Design. Guangzhou, Çin, 45-54.

Zardo, P., Mussi, A. Q. ve da Silva, J. L. (2019, 11–13 Eylül). *The interfaces between technologies and the design process in AEC industry.* Paper presented at the Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution-Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference. Porto, Portekiz, 369-378.

Zengin, N. ve Yamaçlı, R. (2023). Mimari Tasarımda Değişen İklim ve Küresel Isınmanın Rolü. *İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi*(27), 53-71.

Zhang, M. (2020, 7-9 Ağustos). *The applications of parametric design in green building.* Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Şanghay, Çin, 012033.

Zhang, Y. (2024). Optimizing infrastructure development through BIM: A comprehensive analysis of lifecycle benefits and applications. *Theoretical and Natural Science, 34*, 250-255.

Zimmerman, A., Eng, P. (2006). *Integrated design process guide*. Ottawa, Canada: Mortgage and Housing Corporation, 18.



Gazili olmak ayrıcalıktır